

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño de un sistema radiante sectorial con capacidad de transmisión y recepción simultánea en banda W

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Pinazo García, Víctor

Tutor: Polo López, Lucas

Ponente: Ruiz Cruz, Jorge

FECHA: Febrero, 2019

Diseño de un sistema radiante sectorial con capacidad de transmisión y recepción simultánea en banda W

Autor: Pinazo García, Víctor

Tutor: Polo López, Lucas

Ponente: Ruiz Cruz, Jorge



RadioFrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)
Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid

Febrero de 2019

Resumen

Este trabajo final de máster tiene como objetivo el diseño y construcción de un sistema radiante sectorial que trabaje en banda-W. Uno de los propósitos de este trabajo es poder utilizar el dispositivo tanto para funciones de transmisión como de recepción de forma simultánea. La finalidad del sistema será proporcionar a la nueva generación de comunicaciones móviles 5G una antena que provea cobertura sectorial a las estaciones base.

En los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios acerca de las bandas a utilizar en la implantación del 5G y todo apunta a que finalmente la comunicación entre estaciones base será llevada a cabo en banda-W. El dispositivo que se presenta en este documento ha sido diseñado para trabajar en el rango de la banda-W que va de 81GHz a 88GHz, donde se espera que se realicen las tareas de *backhaul*. Dentro de esta parte del espectro se propone hacer una segmentación en dos bandas para aislar los canales de transmisión y de recepción.

En este trabajo se ha desarrollado un diplexor en guía de onda que realizará la labor de la segmentación de las bandas de 81 a 82,5 GHz y de 84,5 a 86GHz. Por otro lado, en este proyecto se propone realizar una antena de bocina sectorial plano H que garantice unas buenas prestaciones en cuanto a adaptación, diagrama de radiación y directividad en ambas bandas. Una vez desarrollados ambos componentes se procederá a su unión de cara a obtener un único dispositivo.

Uno de los objetivos de este proyecto es poder realizar la fabricación del dispositivo. Es conocido que la fabricación de un dispositivo que trabaja en bandas milimétricas supone todo un reto debido a las reducidas dimensiones que presenta. Por ello, se han generado dos modelos adaptados a diferentes tecnologías de fabricación.

En primer lugar, se ha estudiado la opción de mecanización mediante la técnica *diffusion bonding*. Para la realización del modelo se ha desarrollado toda la estructura en plano H con el objetivo de facilitar la fabricación mediante esta técnica y disminuir su coste. Por otro lado, otra de las tecnologías de fabricación que proporciona la precisión suficiente para construir el dispositivo es la fabricación mediante impresión 3D. El modelo también ha sido adaptado a esta técnica de construcción, suponiendo todo un reto debido a las diferentes técnicas requeridas para la mecanización del dispositivo.

Finalmente, se ha concluido este proyecto final de máster construyendo el dispositivo mediante la técnica de impresión 3D.

Palabras clave

Guía de onda, Diplexor, Antena, Divisor de potencia, Parámetros S, Aislamiento, WR-10, Antena de bocina, Directividad, Adaptación, Transmisión, Recepción, Filtro, Bocina tipo Spline, SLL, Decibelios, *Diffusion Bonding*, Impresión 3D.

Abstract

The aim of this Master Thesis is to design and create a sectorial antenna system for applications at W-band. One of the main purposes of this Thesis is being able to use the device for both transmission and reception at the same time. The aim of this is to provide an antenna 5G – which should supply a sectorial coverage for base stations, for the new generation of mobile communications.

During the last years, several research works have been carried out to study the bands to use in the implementation of 5G. Everything points to W-band to be the solution for communications between base stations. The device introduced in this paper was designed to work in the range of W-band that spans from 81GHz to 88GHz. At this point, it is expected to carry out backhaul tasks. Within this area of the spectrum, it is possible to divide in two bands to isolate the transmission and reception channels.

This thesis has developed a diplexer in waveguide that will perform the segmentation of bands with ranges that go from 81 to 82.5GHz as well as from 84.5 to 86GHz. On the other hand, this work proposes the building of an H-Plane sectorial horn antenna in order to ensure high performances in terms of return loss, radiation pattern and directivity in both bands. Once both components are developed, it is possible to join them in order to obtain one single device.

One of the main purposes of this thesis is building a prototype of the device. It is known that the manufacturing of a device which works in millimetric bands can be challenging due to its small dimensions. For this reason, it was necessary to create models adapted to the different manufacturing technologies.

The first option studied was manufacturing by means of diffusion bonding. In order to create the model, a H-Plane design was developed. This technique allowed to make the building easier and to reduce costs. Furthermore, 3D printing also provides accuracy for creating the device. The model was also adapted to that manufacturing technique. This was a huge challenge due to the different techniques required for machining the device.

In the end, the technique used for concluding this thesis was 3D printing.

Keywords

Waveguide, Diplexer, Antenna, Power Splitter, S parameters, Isolation, WR-10, Horn Antenna, Directivity, Adaptation, Transmission, Reception, Filter, Spline Horn Antenna, SLL, Decibel, *Diffusion Bonding*, 3D Printer.

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer todo el apoyo que siempre me ha dado mi familia. En especial a mi padre y mi yayi, que son los que me han soportado después de cada día. También, quiero dar las gracias a mi pareja, sin ti no habría sido posible. Gracias a mis compañeros de clase y los que no estaban en clase: Sito y sus ligues, Lamas y sus inquietudes, Javi y sus antenas, Beltrán y sus protenoides, Gator y sus charlas, Alex y sus posits, Bea y sus risas y Esther y sus gritos, que me han aportado tantos momentos únicos y han estado siempre a mi lado.

Quiero dar las gracias a mi tutor, Lucas, por su cercanía y ayuda durante todo el proyecto y a Jorge, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto.

Gracias a todos.

Por ti, mamá.

Víctor Pinazo García
Febrero 2019

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 ESTADO DEL ARTE	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	4
2 DISEÑO DE LA BOCINA	5
2.1 INTRODUCCIÓN.....	5
2.2 BOCINA ÓPTIMA SECTORIAL PLANO H.....	5
2.3 BOCINA SECTORIAL PLANO H CON UN PERFIL SUAVIZADO	8
2.4 BOCINA SECTORIAL PLANO H TIPO SPLINE.....	10
2.5 ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE LA BOCINA	15
3 DISEÑO DEL DIPLEXOR	19
3.1 INTRODUCCIÓN.....	19
3.2 DISEÑO DE LOS FILTROS	20
3.3 UNIÓN EN T.....	25
3.4 MODELO DIPLEXOR RFCAS	28
3.5 ANÁLISIS CONVERGENCIA DIPLEXOR	30
4 DISPOSITIVO COMPLETO.....	31
4.1 INTRODUCCIÓN.....	31
4.2 DISEÑO DEL BLOQUE COMPLETO	31
4.3 ANÁLISIS ELECTROMAGNÉTICO POR BLOQUES	34
4.4 ANÁLISIS ELECTROMAGNÉTICO DEL BLOQUE COMPLETO	35
5 FABRICACIÓN	39
5.1 DIFFUSION BONDING.....	39
5.2 FABRICACIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN 3D.....	41
5.3 PIEZA DE SUJECIÓN	45
6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	47
6.1 CONCLUSIONES.....	47
6.2 TRABAJO FUTURO	48
REFERENCIAS	49
GLOSARIO	51
ANEXOS	I
A PRESUPUESTO PARA LOS MODELOS DE FABRICACIÓN	I
B PLANOS DE FABRICACIÓN	II
C ESTÁNDAR FLANGE WR-10.....	IV

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1: MEJORAS QUE INTRODUCE LA TECNOLOGÍA 5G.....	1
FIGURA 1-2: ANTENA CONSTRUIDA MEDIANTE LA TÉCNICA DE FABRICACIÓN <i>DIFFUSION BONDING</i> [19].....	3
FIGURA 2-1: BOCINA ÓPTIMA SECTORIAL PLANO H. VISTA PERSPECTIVA.....	5
FIGURA 2-2: BOCINA ÓPTIMA SECTORIAL PLANO H. VISTA PLANTA.....	6
FIGURA 2-3: MÓDULO DEL PARÁMETRO S_{11} DE LA BOCINA ÓPTIMA PLANO H.....	6
FIGURA 2-4: DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO DE LA BOCINA PLANO H ÓPTIMA.....	7
FIGURA 2-5: DIAGRAMA DE RADIACIÓN NORMALIZADO DE LA BOCINA PLANO H ÓPTIMA.....	7
FIGURA 2-6: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL CONFORMADO.....	8
FIGURA 2-7: MÓDULO DEL PARÁMETRO S_{11} DE LA BOCINA PLANO H CON EL PERFIL SUAVIZADO.....	9
FIGURA 2-8: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL CONFORMADO.....	9
FIGURA 2-9: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL CONFORMADO.....	10
FIGURA 2-10: PERFIL INTERNO DE UNA BOCINA DE 5 SECCIONES.....	11
FIGURA 2-11: PERFIL INTERNO DE UNA BOCINA TIPO SPLINE DE 5 SECCIONES.....	11
FIGURA 2-12: MÓDULO DEL PARÁMETRO S_{11} DE LA BOCINA PLANO H TIPO SPLINE.....	12
FIGURA 2-13: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL SPLINE.....	12
FIGURA 2-14: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL SPLINE.....	13
FIGURA 2-15: MÓDULO DEL PARÁMETRO S_{11} DE LA BOCINA PLANO H TIPO SPLINE FINAL.....	13
FIGURA 2-16: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL SPLINE.....	14
FIGURA 2-17: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL SPLINE.....	14
FIGURA 2-18: BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL SPLINE FINAL.....	15
FIGURA 2-19: ANÁLISIS DE LA DIRECTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL MALLADO UTILIZADO. $F = 81,5$ GHz.....	16
FIGURA 2-20: ANÁLISIS DE LA DIRECTIVIDAD EN FUNCIÓN DEL MALLADO UTILIZADO. $F = 85,3$ GHz.....	16
FIGURA 2-21: MÓDULO DEL PARÁMETRO S_{11} DE LA BOCINA PARA MALLADOS DE DISTINTA RESOLUCIÓN.....	17
FIGURA 2-22: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA BOCINA PARA MALLADOS DE DISTINTA RESOLUCIÓN. $F = 81,5$ GHz.....	17
FIGURA 2-23: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA BOCINA PARA MALLADOS DE DISTINTA RESOLUCIÓN. $F = 85,3$ GHz.....	18
FIGURA 3-1: ESQUEMA DEL DIPLEXOR.....	19
FIGURA 3-2: CONFIGURACIONES DE UNIÓN EN T DE TRES PUERTAS.....	20
FIGURA 3-3: CONFIGURACIONES FILTRO ELEMENTOS CONCENTRADOS [20].....	20
FIGURA 3-4: RESULTADO FILTROS ELEMENTOS CONCENTRADOS BANDA INFERIOR.....	21
FIGURA 3-5: CONFIGURACIÓN DE UN FILTRO DE RESONADORES SERIE EN LA RAMA SERIE UTILIZANDO LÍNEAS $\lambda/2$ E INVERSORES IDEALES [20].....	21
FIGURA 3-6: RESULTADO FILTRO RESONADORES SERIE EN LA RAMA SERIE UTILIZANDO LÍNEAS $\lambda/2$ E INVERSORES IDEALES.....	22
FIGURA 3-7: RESULTADO DE LOS FILTROS SUPERPUESTOS UTILIZANDO <i>MODE-MATCHING</i>	23
FIGURA 3-8: RESULTADO DE LOS FILTROS OPTIMIZADOS UTILIZANDO <i>MODE-MATCHING</i>	23
FIGURA 3-9: FILTRO PASO BANDA EN CST.....	24
FIGURA 3-10: RESPUESTA DE LOS FILTRO PASO BANDA EN CST.....	25
FIGURA 3-11: DIVISOR EN T.....	25
FIGURA 3-12: DIVISOR EN T COMPUESTO DE DOS IRIS INDUCTIVOS.....	26
FIGURA 3-13: ASPECTO FINAL DEL DIPLEXOR. VISTA EN PERSPECTIVA.....	27
FIGURA 3-14: ASPECTO FINAL DEL DIPLEXOR. VISTA EN PLANTA.....	27
FIGURA 3-15: RESPUESTA DEL DIPLEXOR.....	27
FIGURA 3-16: RESPUESTA DEL DIPLEXOR EN MATLAB.....	28
FIGURA 3-17: ASPECTO FINAL DEL DIPLEXOR. VISTA EN PERSPECTIVA.....	29
FIGURA 3-18: ASPECTO FINAL DEL DIPLEXOR. VISTA EN PLANTA.....	29
FIGURA 3-19: RESPUESTA DEL DIPLEXOR EN CST, <i>FREQUENCY DOMAIN SOLVER</i>	29
FIGURA 3-20: MÓDULO DEL PARÁMETRO S_{11} PARA DIFERENTES MALLADOS.....	30
FIGURA 4-1: BLOQUES DEL SISTEMA.....	31
FIGURA 4-2: DISEÑO COMPLETO DEL DISPOSITIVO. VISTA EN PERSPECTIVA.....	32
FIGURA 4-3: DISEÑO COMPLETO DEL DISPOSITIVO. VISTA PLANTA.....	33
FIGURA 4-4: DISEÑO COMPLETO DEL DISPOSITIVO BLOQUE METÁLICO. VISTA EN PERSPECTIVA.....	33
FIGURA 4-5: DIAGRAMA DE LA COMBINACIÓN CIRCUITAL PARA OBTENER LA RESPUESTA DEL DISPOSITIVO COMPLETO.....	34
FIGURA 4-6: PARÁMETROS S DE LA SIMULACIÓN POR BLOQUES EN CST.....	35

FIGURA 4-7: RESPUESTA DE LA SIMULACIÓN DEL BLOQUE ENTERO EN CST.	36
FIGURA 4-8: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL DISPOSITIVO COMPLETO.	37
FIGURA 4-9: DIAGRAMA DE RADIACIÓN DEL DISPOSITIVO COMPLETO.	37
FIGURA 5-1: PASOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN <i>DIFFUSION BONDING</i> . [19].....	39
FIGURA 5-2: BLOQUE DEL DISPOSITIVO A FABRICAR MEDIANTE LA TÉCNICA <i>DIFFUSION BONDING</i> . VISTA EN PERSPECTIVA.....	40
FIGURA 5-3: BLOQUE DEL DISPOSITIVO A FABRICAR MEDIANTE LA TÉCNICA <i>DIFFUSION BONDING</i> . VISTA ALZADO.....	41
FIGURA 5-4: DIVISIÓN DEL DISPOSITIVO EN DOS BLOQUES PARA SU FABRICACIÓN	42
FIGURA 5-5: PIEZA DE PLÁSTICO A FABRICAR Y METALIZAR MEDIANTE <i>JET METAL</i>	42
FIGURA 5-6: PIEZA DE METÁLICA A FABRICAR.	43
FIGURA 5-7: RESULTADO DEL DIPLEXOR CON UN REDONDEO EN LA GUÍA DE ENTRADA DE 0,25MM.....	44
FIGURA 5-8: PIEZA METÁLICA DESPUÉS DE LA FABRICACIÓN.....	44
FIGURA 5-9: PIEZA DESARROLLADA PARA LA SUJECCIÓN DEL DISPOSITIVO Y SU ANCLAJE EN LA CÁMARA ANECOICA.	45
FIGURA 5-10: SOPORTE FABRICADO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D. VISTA EN ALZADO.	46
FIGURA 5-11: SOPORTE FABRICADO MEDIANTE IMPRESIÓN 3D. VISTA EN PERSPECTIVA.	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: DIMENSIONES DE LA BOCINA ÓPTIMA SECTORIAL PLANO H.	6
TABLA 2-2: DIMENSIONES DE LA BOCINA SECTORIAL PLANO H CON PERFIL CONFORMADO.....	8
TABLA 3-1: DIMENSIONES FILTROS PASA BANDA.	24

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2-1.....	5
-------------------	---

1 Introducción

1.1 Motivación

El panorama tecnológico está cambiando [1], [2]. La primera generación (1G) de telefonía móvil celular hizo su aparición en el año 1990. Posteriormente, con la habilitación de los mensajes de texto entre dos dispositivos, se pasó a la segunda generación (2G). Más tarde, la tercera generación (3G) le dio al usuario la capacidad de navegar por Internet, además de realizar llamadas y enviar mensajes de texto. Por último, la cuarta generación (4G) dotó a este sistema de mayor velocidad. La gran demanda en velocidad de uso de datos móviles y la necesidad de más ancho de banda han incentivado el desarrollo de la quinta generación en comunicaciones móviles (5G) [3]. Este nuevo estándar de comunicación propone una serie de nuevas funcionalidades (ver Figura 1-1).

Para lograr una introducción correcta del 5G, no solo es necesaria la creación de un ecosistema de plataformas y servicios 5G, sino que las infraestructuras y las redes de telecomunicaciones deben evolucionar. Toda esta información se recoge en el Plan Nacional de 5G [4], cuyo objetivo principal es que el país esté preparado para el momento en el que esta nueva tecnología alcance su madurez tecnológica y comercial.

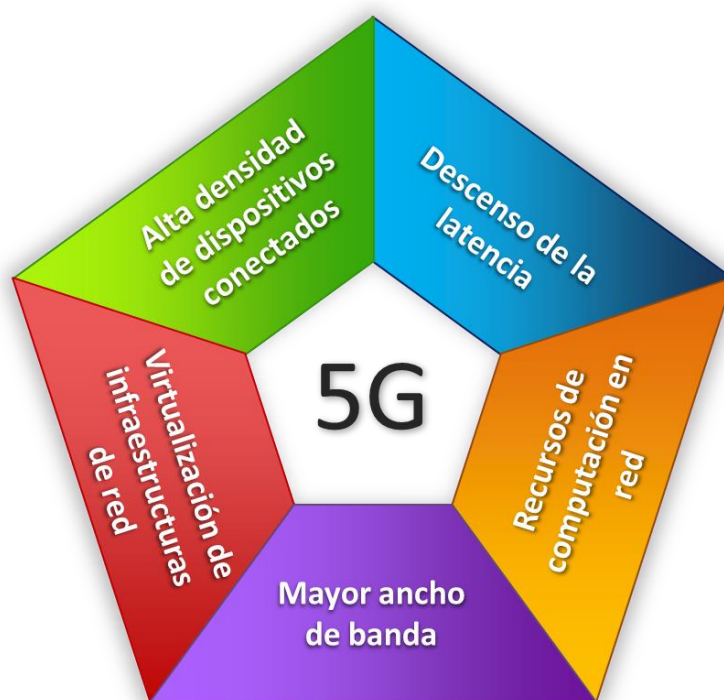


Figura 1-1: mejoras que introduce la tecnología 5G.

Con la llegada de esta nueva generación de comunicaciones móviles, las entidades internacionales trabajan para detallar y acordar las nuevas bandas de frecuencias armonizadas para servicios 5G. Las atribuciones de las bandas del espectro se determinan en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones (CMR) por la Unión Internacional

de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés), que se celebran cada tres o cuatro años. La ITU fijó de cara a la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2019 el estudio de 11 bandas de frecuencia para el uso de la tecnología 5G [5]. Dentro de estas bandas a estudiar, este Trabajo Final de Máster se centrará en la banda-W, comprendida entre 75 GHz y 110 GHz y más concretamente en la banda que va desde los 81 a los 86 GHz. Cabe destacar que la banda-W definida el IEEE de 75GHz a 110GHz también se conoce como banda-E (de 60 GHz a 90GHz) en el área de las guías de onda.

Las diferentes empresas de la industria de las telecomunicaciones han comenzado a trabajar sobre las bandas mencionadas, especificando los requisitos técnicos de sus sistemas 5G. En este sentido, los vendedores de equipamiento, como Nokia [6] en 2017, Ericsson [7] en 2017 o Huawei [8], [9] en 2016 y 2018, se han puesto de acuerdo en sus informes acerca del uso y especificaciones para la banda-E. En estos informes se comenta que dicha banda se usara como frecuencia para las comunicaciones entre los enlaces intermedios (en inglés *backhaul*) y para el núcleo de la red. En la actualidad, ya se han realizado estudios que avalan el uso de esta banda para comunicaciones *backhaul* [10].

1.2 Estado del arte

En el diseño de dispositivos de microondas, las técnicas CAD a utilizar se pueden dividir en dos grupos: análisis numéricos, donde se puede destacar el método de elementos finitos (FEM) y, por otro lado, el análisis cuasi-analítico como, por ejemplo, el método de análisis modal (*Mode-matching*) [11], [12], [13]. Aunque ambos métodos son válidos, cada uno posee, dependiendo del problema, ventajas e inconvenientes.

Las herramientas software de propósito general para el diseño de dispositivos de microondas emplean normalmente técnicas de análisis numérico, debido a que abarcan un rango amplio de problemas. Sin embargo, existe una serie de casos particulares donde el empleo de dicha técnica es inabordable ya que requiere un elevado tiempo de cómputo. Por otro lado, el análisis cuasi-analítico [11] es más eficiente, pero solo funciona para un rango de problemas más pequeño.

La impresión 3D en la construcción de dispositivos de microondas es un sector en plena evolución. Esta técnica de fabricación aditiva ha sido una de las evaluadas para la realización de este proyecto, ya que permite la construcción de estructuras complejas a un coste bajo. El proceso consiste en el modelado de objetos físicos depositando el material por capas. Una vez terminado el proceso de impresión 3D, se metaliza el objeto. En este proyecto se estudia la técnica *Jet metal* [14]. La impresión 3D es capaz de conseguir resultados muy parecidos a los simulados, incluso en bandas milimétricas como en la banda-E [15].

Por otro lado, *diffusion bonding* es otra técnica de fabricación aditiva cuyo interés en el mercado va en aumento [16]. Esta técnica se ha estudiado durante los últimos años para la construcción de dispositivos que trabajan en bandas milimétricas y se han obtenido buenos resultados [17], [18]. Además, *diffusion bonding* es una técnica capaz de unir diferentes láminas metálicas en un bloque compacto gracias a la combinación adecuada de presión y temperatura por debajo del punto de fusión. Esta técnica de fabricación ya ha sido utilizada en un trabajo anterior desarrollado en la Escuela Politécnica Superior (EPS-UAM) demostrando su alto rendimiento [19] (ver Figura 1-2).

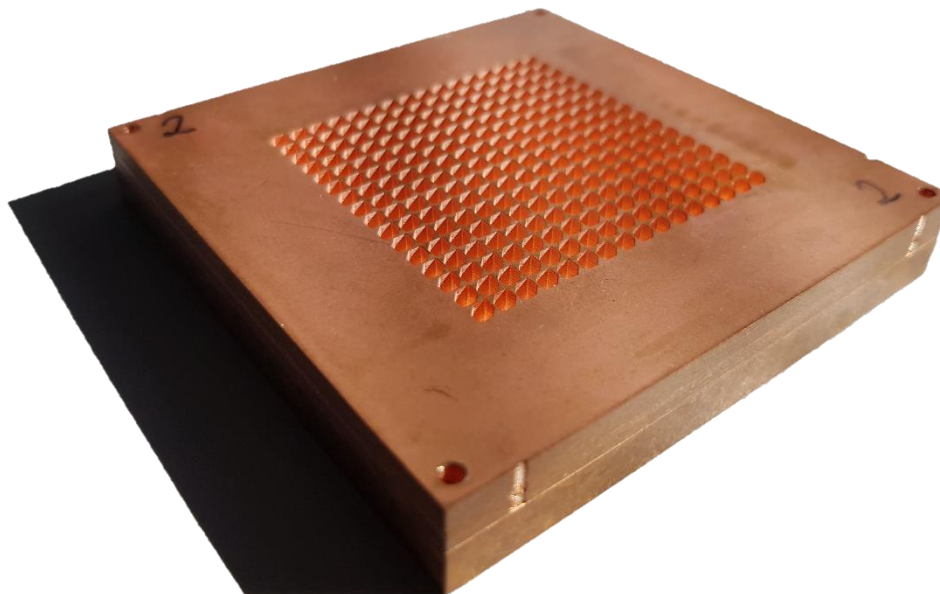


Figura 1-2: antena construida mediante la técnica de fabricación *diffusion bonding* [19].

1.3 Objetivos

En este TFM se ha propuesto diseñar una antena en la banda-W que trabaje en las frecuencias especificadas. Dentro de este margen se propone hacer una segmentación de dos bandas, una de 81 a 82,5 GHz y otra de 84,5 a 86 GHz. El objetivo de dicha fragmentación es poder utilizar una misma antena tanto para la transmisión como para la recepción. De esta forma en cada estación base solo será necesario utilizar un único sistema de radiofrecuencia, lo cual reduce los costes y el tamaño. Además, cabe mencionar que, como se ha comentado, *backhaul* implica tanto comunicaciones entre estaciones base como comunicaciones entre dichas estaciones y el núcleo de la red. En este proyecto se propone utilizar las bandas de frecuencia establecidas de 81 a 82,5 GHz y de 84,5 a 86 GHz para llevar a cabo las comunicaciones entre las estaciones base, aislando estas bandas de las frecuencias comprendidas de 82,5 a 84,5 GHz que se utilizarían para las comunicaciones entre estaciones base y el núcleo. De esta forma, se evita la interferencia cocanal entre las diferentes bandas a usar.

Para llevar a cabo esta segmentación, se propone el diseño de un diplexor en guía de onda [20], [21] que separe las bandas fijadas. Por otro lado, se realizará el diseño e implementación del elemento radiante. En este TFM se propone realizar una antena de bocina sectorial plano H. Para alcanzar este objetivo, se realizará una primera bocina sectorial óptima [11], que se modificará para obtener una adaptación buena en las bandas fijadas, así como una ganancia de al menos 13 dBi.

Una vez desarrollados ambos componentes se procederá a su unión y a un estudio general para comprobar la realización y fabricación del diseño completo.

1.4 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción**

En primer lugar, se introduce el Trabajo Final de Máster explicando brevemente el estado del arte y los objetivos a alcanzar en el proyecto.

- **Capítulo 2: Diseño de la bocina**

En este capítulo se explica el proceso de diseño del elemento radiante. Durante este capítulo se comentarán los distintos prototipos llevados a cabo.

- **Capítulo 3: Diseño del diplexor**

En este capítulo se abordará el proceso de diseño del diplexor así como se mostraran los diferentes modelos realizados.

- **Capítulo 4: Dispositivo completo**

En este capítulo se procede a explicar el proceso de unión de los dos elementos desarrollados a la vez que se muestran los resultados de la simulación.

- **Capítulo 5: Fabricación**

Durante esta sección se realiza un recorrido por los diferentes métodos de fabricación estudiados, así como los resultados.

- **Capítulo 6: Conclusión y trabajo futuro**

Por último, se exponen las conclusiones extraídas del proyecto y se definen una serie de trabajos futuros.

2 Diseño de la bocina

2.1 Introducción

El siguiente punto para tratar en esta memoria será el diseño del elemento radiante a utilizar en el sistema. Como ya se ha mencionado previamente, las bocinas son una de las antenas que más se emplean en las bandas de microondas, puesto que proporcionan valores altos de directividad, un número bajo de pérdidas y un buen ancho de banda.

En este proyecto, la bocina que se implementará será de tipo sectorial plano H. Se ha escogido esta bocina con la intención de seguir un diseño de la antena completa (diplexor más bocina) en plano H donde la altura de toda la estructura sea la misma. De este modo, se facilitará la fabricación del dispositivo mediante la técnica ya explicada (*diffusion bonding*) así como una reducción en los costes de producción.

Para el diseño de la bocina se han acordado una serie de especificaciones a cumplir. En primer lugar, se desea obtener un coeficiente de reflexión en ambas bandas por debajo de -20 dB. Por otro lado, se espera tener un nivel de directividad en las bandas deseadas por encima de 13 dBi.

2.2 Bocina óptima sectorial plano H

Como punto de partida, se utilizará un modelo simplificado basado en una bocina óptima [11]. De esta forma, se obtienen el resto de los valores para un tamaño de apertura determinado, que hacen que la bocina posea, como máximo, un error de fase tal que:

$$t_{opt} = \frac{A_{opt}^2}{8\lambda_0 R_1} = \frac{3}{8} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Para ello, se ha escrito un *script* en lenguaje Matlab que lleva a cabo los cálculos. La bocina ha sido diseñada tomando como frecuencia central 85,3 GHz. El resultado obtenido se muestra en la Figura 2-1 y en la Figura 2-2.

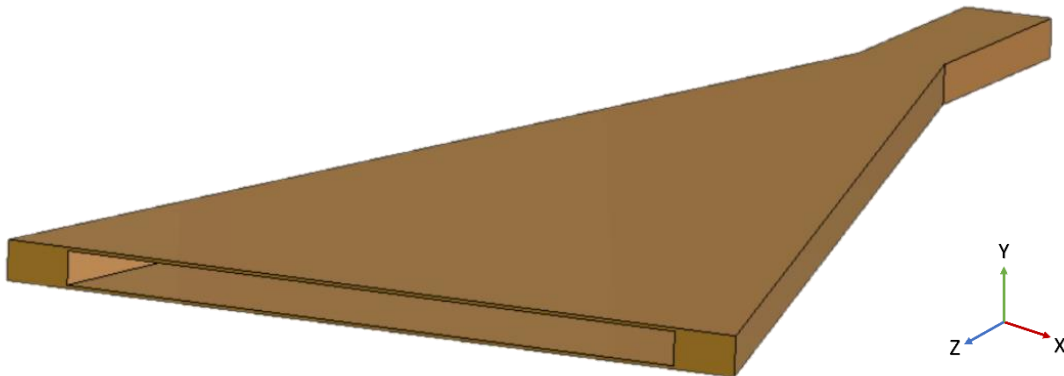


Figura 2-1: bocina óptima sectorial plano H. Vista perspectiva.

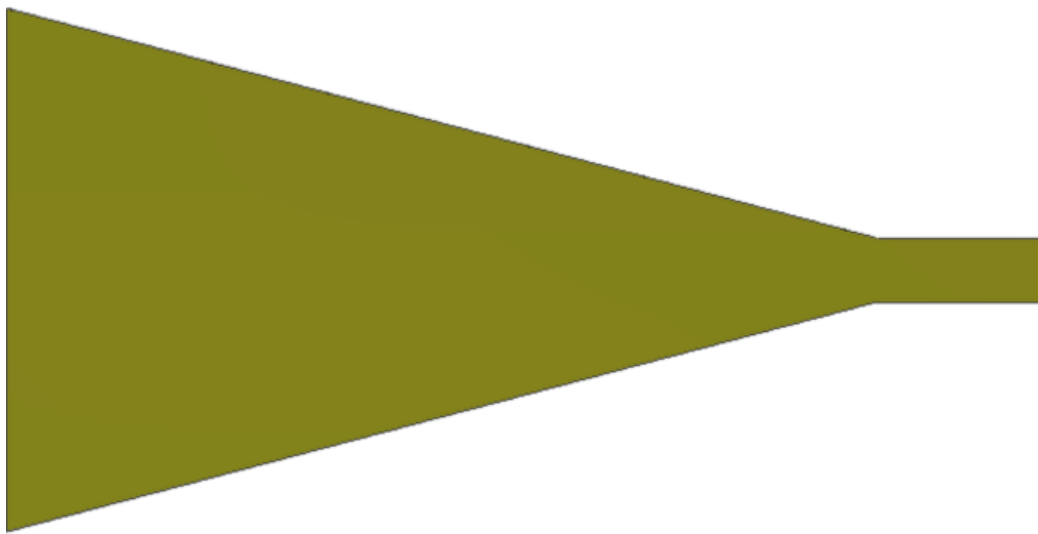


Figura 2-2: bocina óptima sectorial plano H. Vista Planta.

Las dimensiones utilizadas para la realización de esta bocina son las que se muestran en la Tabla 2-1.

Nombre	Valor [mm]
Anchura de la guía	2
Altura de la guía	1,27
Apertura	24
Longitud de la bocina	47,9

Tabla 2-1: dimensiones de la bocina óptima sectorial plano H.

En este primer diseño se ha obtenido un coeficiente de reflexión por encima del nivel deseado en las dos bandas de paso del sistema a implementar. El módulo del parámetro S11 obtenido se puede observar en la Figura 2-3:

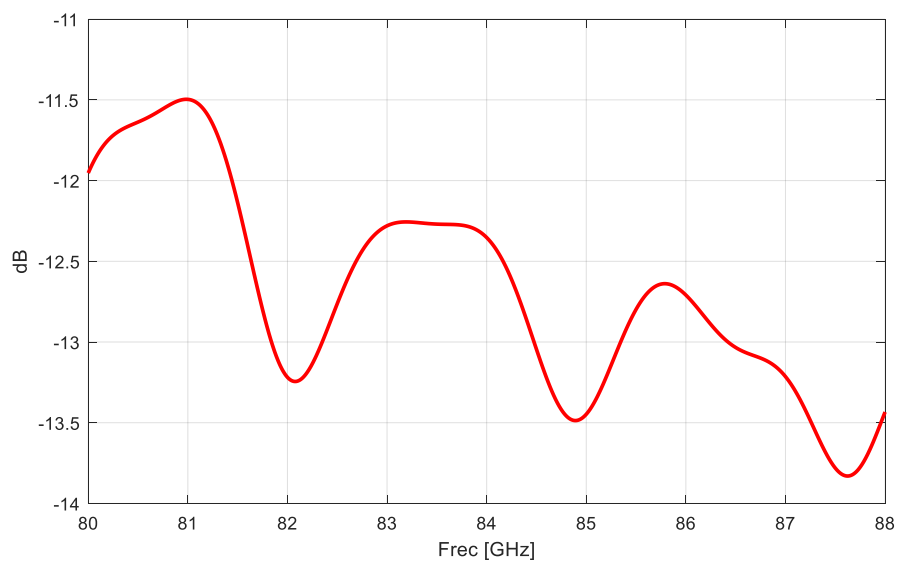


Figura 2-3: módulo del parámetro S11 de la bocina óptima plano H.

A continuación, se muestra el diagrama de radiación en los planos $\varphi=0^\circ$, 90° , copolar a 45° y contrapolar a 45° para las frecuencias centrales de ambas bandas en la Figura 2-4 y en la Figura 2-5.

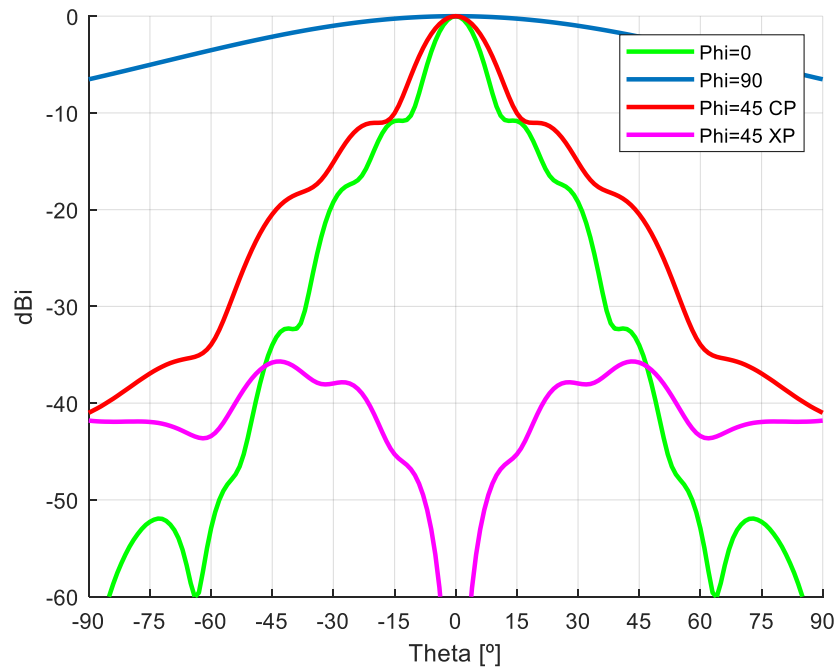


Figura 2-4: diagrama de radiación normalizado de la bocina plano H óptima.
 $f = 81,5 \text{ GHz}$ D_0 : 13,7 dBi.

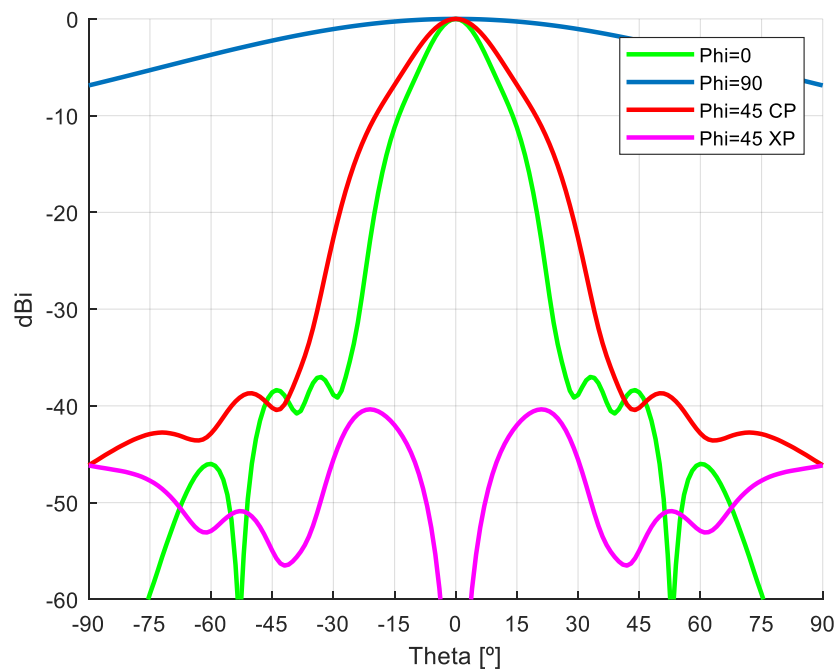


Figura 2-5: diagrama de radiación normalizado de la bocina plano H óptima.
 $f = 85,3 \text{ GHz}$ D_0 : 13,3 dBi.

A pesar de que los diagramas de radiación son razonablemente buenos, este diseño se descartará debido a la pobre adaptación que presenta en las bandas de paso, tal y como se ha visto en la Figura 2-3.

2.3 Bocina sectorial plano H con un perfil suavizado

En la sección anterior se ha observado que, con ese modelo de bocina, no se llegaba a obtener una solución que brindara una buena adaptación en las bandas de paso marcadas por la aplicación del sistema. Por lo tanto, en esta sección se estudiará la opción de una antena de bocina plano H cuyo perfil será conformado. Para ello se partirá del perfil sectorial anterior y se elegirá un punto cualquiera del mismo. Posteriormente se definirá un nuevo perfil de bocina mediante una interpolación de tercer orden entre los puntos del perfil correspondientes a la guía de entrada, el extremo de la apertura y el punto arbitrario elegido.

La elección de diferentes puntos a lo largo del perfil de la bocina dará lugar a diferentes perfiles conformados. De este modo, se introduce un grado de libertad adicional, que se espera que permita mejorar las prestaciones de la bocina. Este tipo de bocina hará posible obtener un mayor control sobre el coeficiente de reflexión a la entrada. El perfil final de la bocina obtenido es el que se muestra en la Figura 2-6.

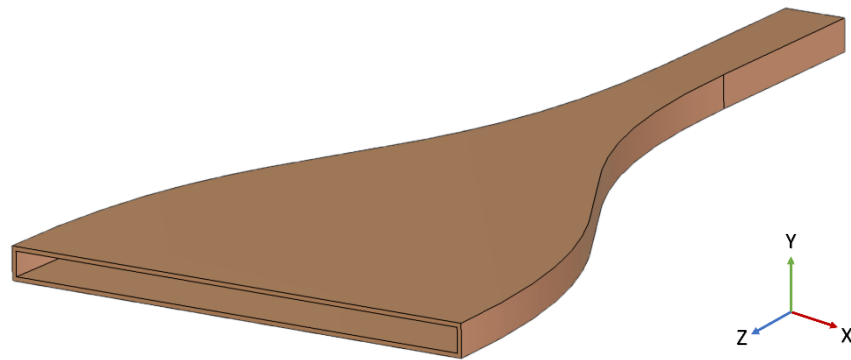


Figura 2-6: bocina sectorial plano H con perfil conformado.

Las dimensiones utilizadas para la realización de esta bocina con el perfil suavizado se muestran en la Tabla 2-2.

Nombre	Valor [mm]
Suavizado	0,228
Apertura	21,9
Longitud de la bocina	36,5

Tabla 2-2: dimensiones de la bocina sectorial plano H con perfil conformado.

Después de un extenso trabajo de optimización, se ha logrado adaptar la bocina a las bandas de paso fijadas y obtenidas en el capítulo anterior. El resultado del parámetro S11 obtenido se puede observar en la Figura 2-7:

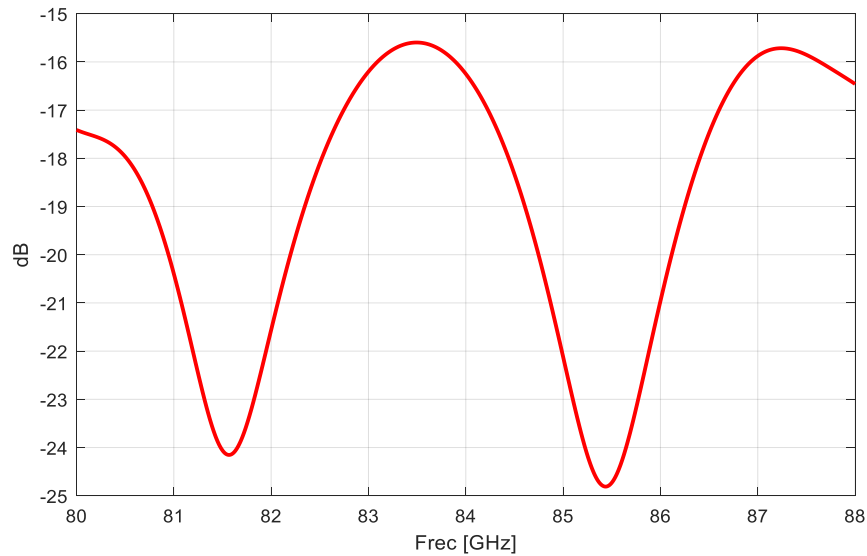


Figura 2-7: módulo del parámetro S11 de la bocina plano H con el perfil suavizado.

Tal y como se puede observar, el parámetro S11 se mantiene por debajo de los -20 dB tanto en el canal 1 (de 81,1 GHz a 82,1 GHz) como en el canal 2 (de 84,7 GHz a 85,7GHz). Esto permitirá alcanzar la adaptación final deseada tras la unión del diplexor y la bocina.

Antes de finalizar este diseño, se comprobaron los diagramas de radiación para ambas bandas. Los resultados son los que se muestran a continuación en la Figura 2-8 y Figura 2-9.

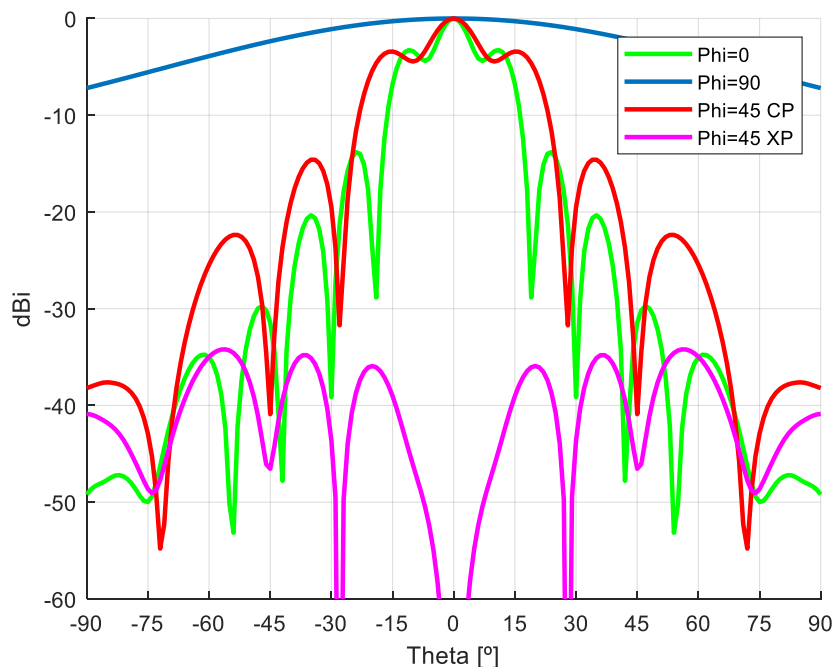


Figura 2-8: bocina sectorial plano H con perfil conformado.

$$f = 81,5 \text{ GHz} \quad D_0: 13 \text{ dBi.}$$

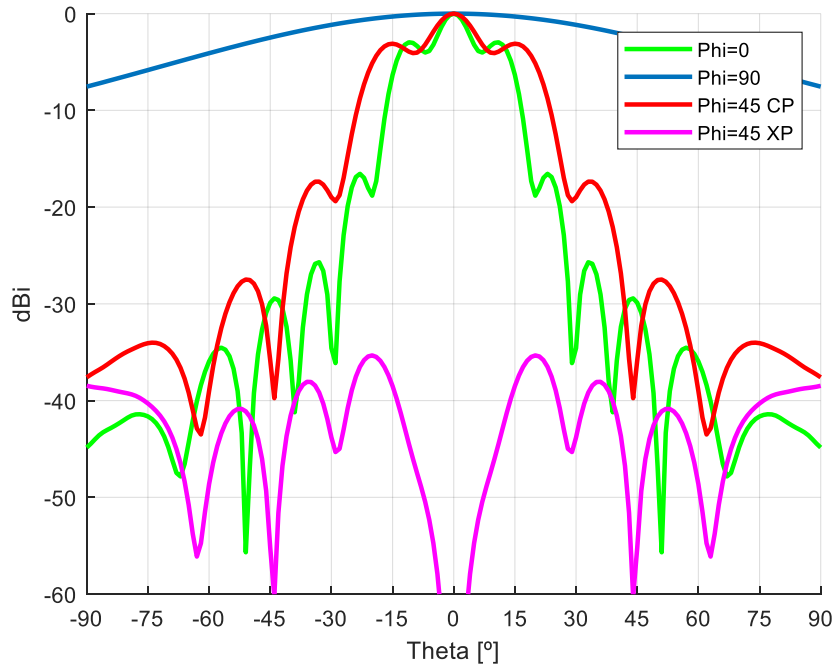


Figura 2-9: bocina sectorial plano H con perfil conformado.

$$f = 85,3 \text{ GHz} \quad D_0: 13 \text{ dBi.}$$

Como se puede observar, los diagramas de radiación presentan un rizado no deseado en el lóbulo principal debido al error de fase que presenta el campo en la apertura. Aunque se ha invertido un gran esfuerzo para compensar este efecto, no se ha encontrado ninguna configuración con la que se redujera el error de fase y se lograra el nivel de adaptación deseado.

2.4 Bocina sectorial plano H tipo spline

Con el objetivo de aumentar el número de grados de libertad en el diseño, se define un nuevo perfil para la bocina basado en una spline [22], [23]. Al tener más parámetros de diseño se espera conseguir mejorar el diagrama de radiación de la bocina y, a su vez, mantener un buen nivel de adaptación en los canales del sistema.

Para cumplir estos objetivos, se llevará a cabo una modificación del perfil de la bocina a través de cinco puntos. La posición de dichos puntos variará tanto en la dimensión longitudinal como transversal. Para empezar, se ha generado el perfil de una bocina sectorial óptima que contuviera los cinco puntos a variar. Este perfil se muestra en la Figura 2-10.

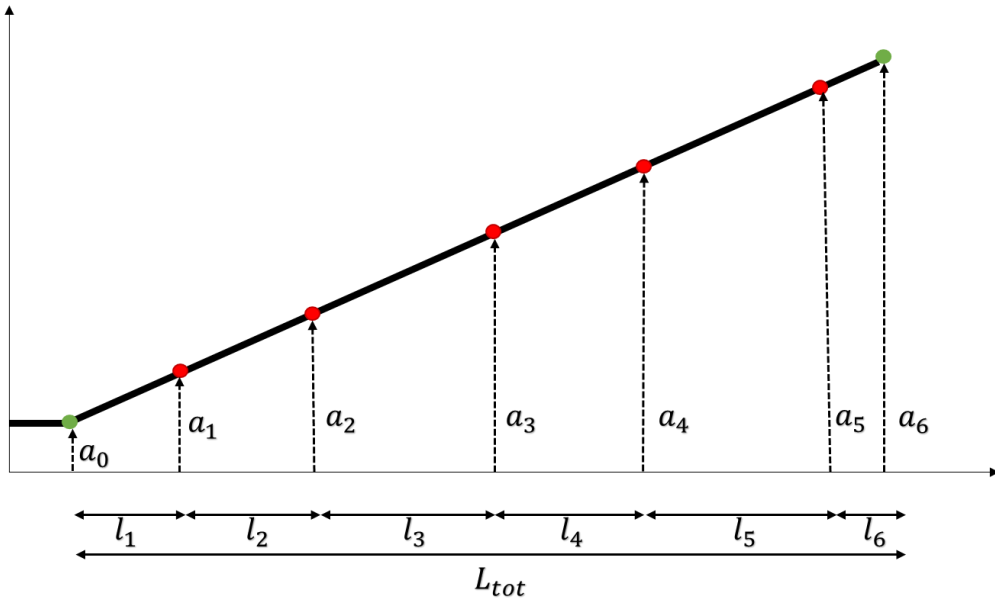


Figura 2-10: perfil interno de una bocina de 5 secciones.

Para llevar a cabo el diseño del perfil, este proyecto usará la herramienta para crear curvas de tipo spline presente en el software CST, con una interpolación entre los puntos especificados. Es importante remarcar que el perfil tendrá dos puntos adicionales a los extremos de la curva que serán fijos (ver puntos de color verde en la Figura 2-11).

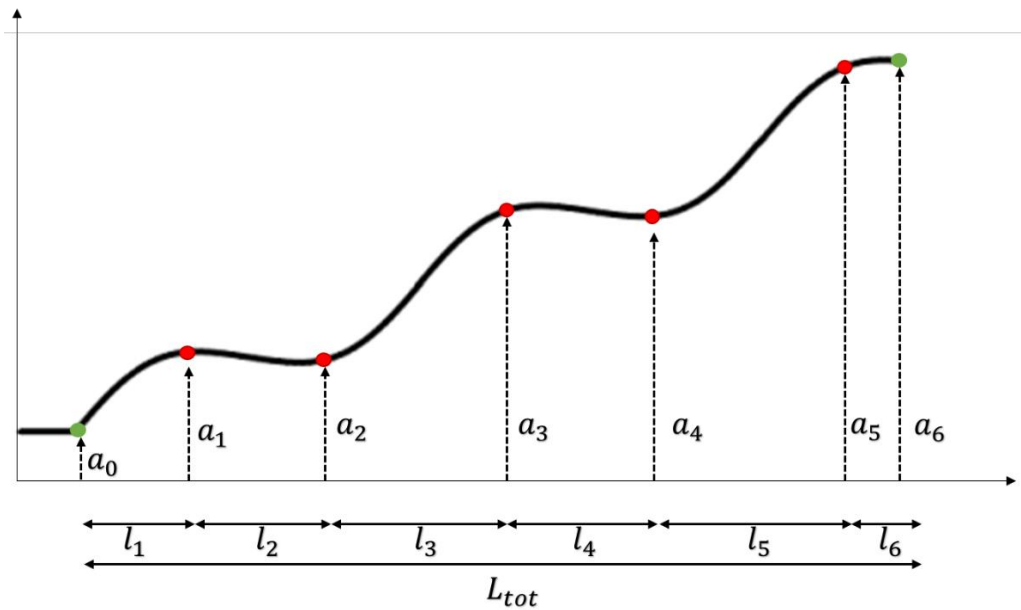


Figura 2-11: perfil interno de una bocina tipo spline de 5 secciones.

El punto más a la izquierda del perfil acota el semi ancho a_0 de la guía de alimentación del elemento radiante. Por otro lado, el último punto fijado en la estructura hará que el diseño se atenga a una longitud L_{tot} y al semi ancho de apertura a_6 previamente establecidos. Tal y como aparecen en la Figura 2-11, el resto de los puntos denotados con el color rojo serán puntos variables del diseño. Es esencial optimizar la posición de estos cinco puntos para cumplir con los objetivos de radiación y adaptación deseados.

En este proceso de optimización se ha buscado mejorar la bocina en varios aspectos. Primero, se ha perseguido mantener un nivel de adaptación en ambas bandas de diseño por debajo de -20 dB. Por otro lado, se ha buscado evitar el rizado en el diagrama de radiación para ambos canales, intentado asemejar el diagrama resultante a un diagrama tipo pincel. El resultado del parámetro S11 obtenido se puede observar en la Figura 2-12:

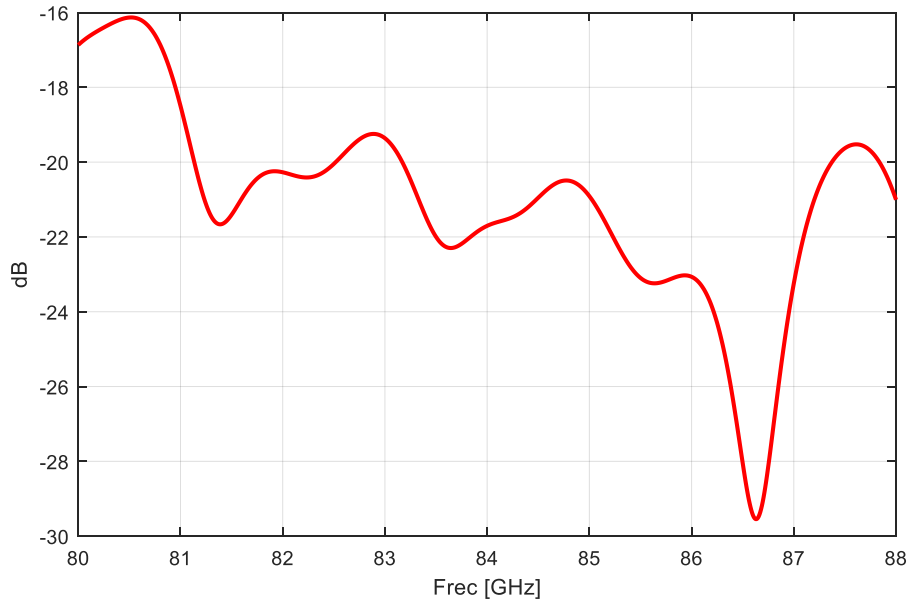


Figura 2-12: módulo del parámetro S11 de la bocina plano H tipo spline.

Tal y como se puede observar en la figura anterior, tanto la adaptación en el canal 1 (de 81,1 GHz a 82,1 GHz) como en el canal 2 (de 84,7 GHz a 85,7 GHz) se mantienen con niveles aceptables. Para finalizar, se llevará a cabo un estudio de los diagramas de radiación normalizados para ambas bandas. Estos se muestran en la Figura 2-13 y en la Figura 2-14.

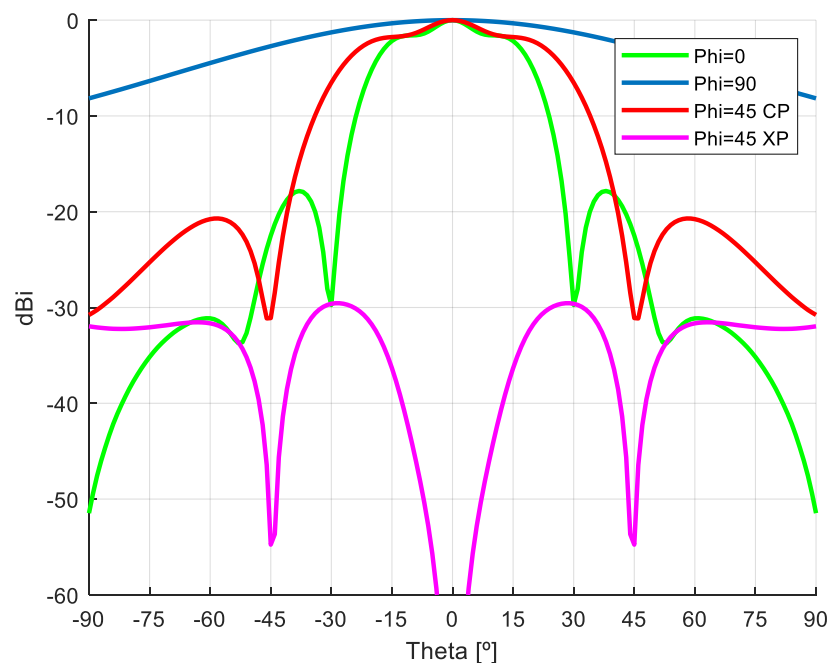


Figura 2-13: bocina sectorial plano H con perfil spline.
 $f = 81,5 \text{ GHz}$ $D_0: 10,8 \text{ dBi}$.

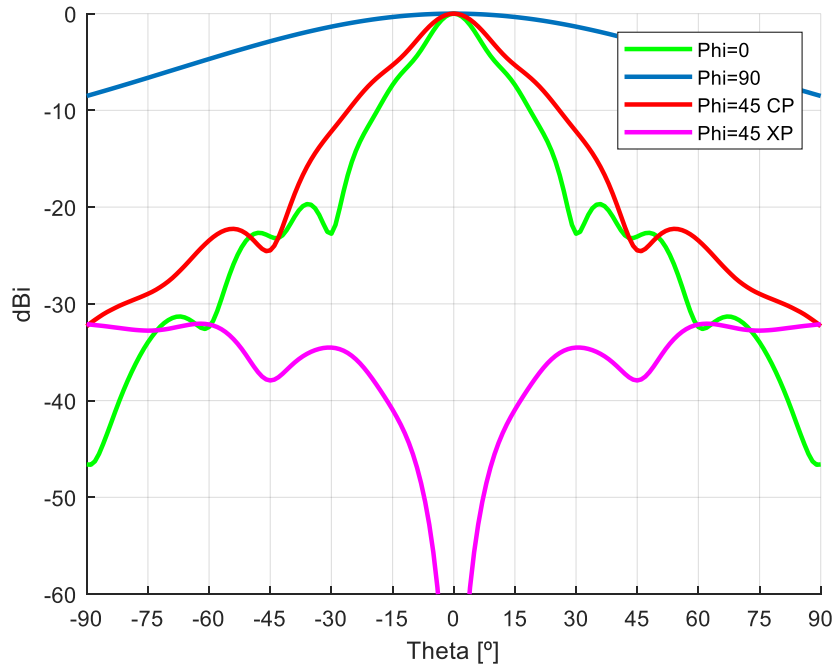


Figura 2-14: bocina sectorial plano H con perfil spline.
 $f = 85,3 \text{ GHz}$ $D_0: 13,1 \text{ dBi}$.

Tal y como se puede observar, los diagramas de radiación poseen un perfil aceptable y la adaptación en las bandas especificadas es buena. Sin embargo, el valor de directividad obtenido a $81,5 \text{ GHz}$ es demasiado bajo ($10,8 \text{ dBi}$) en comparación con la directividad de la bocina sectorial convencional ($13,7 \text{ dBi}$). Por ello, y de cara a obtener mejores resultados en un dispositivo real fabricado, se ha vuelto a optimizar la bocina con el objetivo de obtener al menos 13 dBi de directividad en las frecuencias centrales de ambas bandas, aunque para ello se deba admitir un peor resultado para el parámetro S_{11} . El nuevo resultado del parámetro S_{11} obtenido se puede observar en la Figura 2-15:

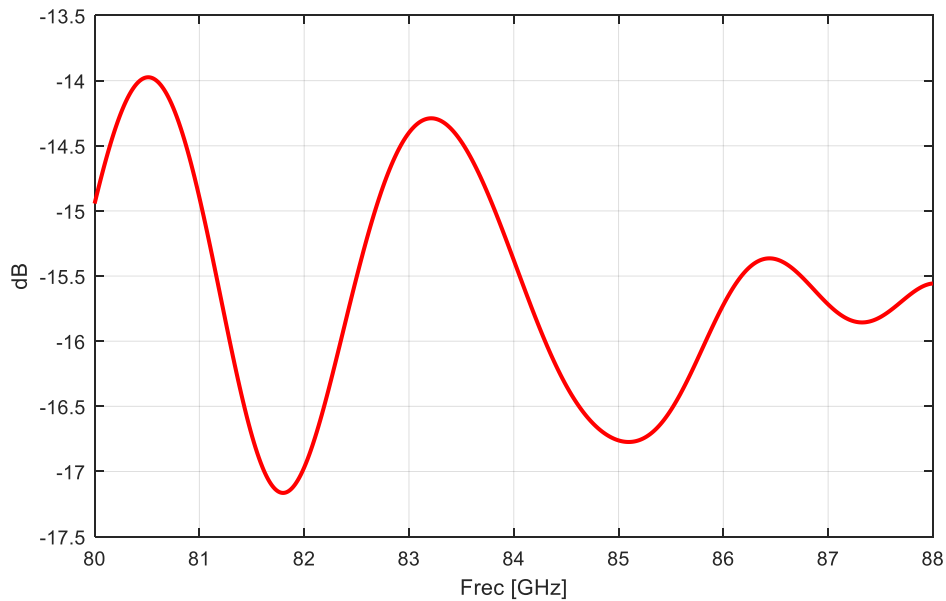


Figura 2-15: módulo del parámetro S_{11} de la bocina plano H tipo spline final.

Por último, la Figura 2-16 y la Figura 2-17 muestran los nuevos diagramas de radiación junto con sus valores de directividad.

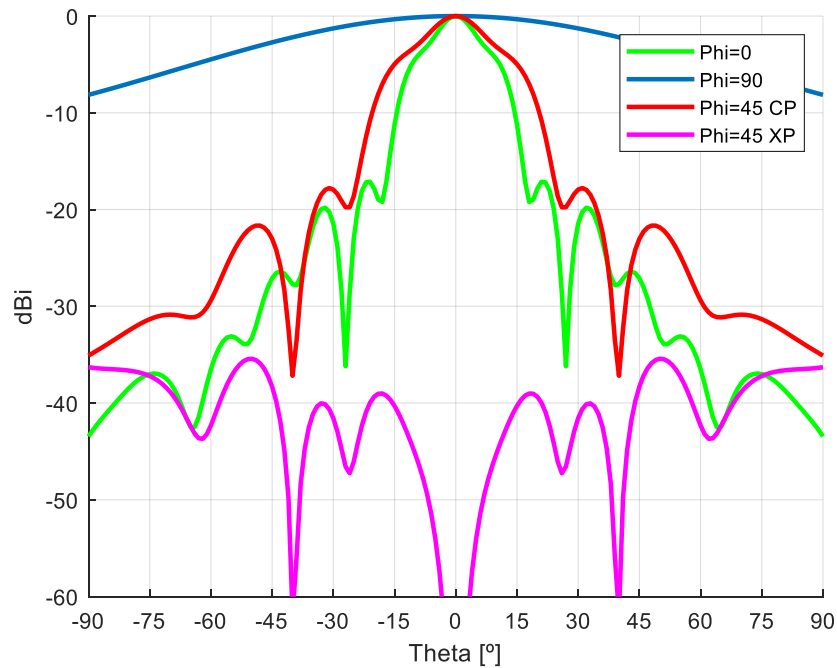


Figura 2-16: bocina sectorial plano H con perfil spline.
 $f = 81,5 \text{ GHz}$ $D_0: 13,5 \text{ dBi}$.

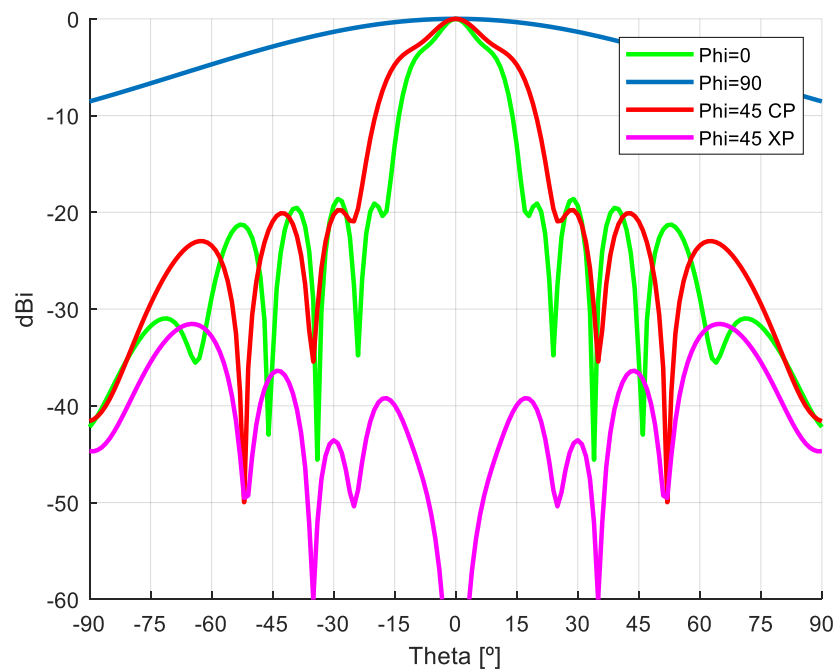


Figura 2-17: bocina sectorial plano H con perfil spline.
 $f = 85,3 \text{ GHz}$ $D_0: 13,6 \text{ dBi}$.

Como se puede apreciar en las representaciones anteriores, se ha logrado obtener un nivel muy alto de directividad a costa de empeorar la adaptación. Este nivel de directividad se asemeja al obtenido en la bocina sectorial, con la diferencia de que este diseño consigue un buen nivel de directividad a dos frecuencias diferentes, mientras que el diagrama de radiación de la bocina sectorial se diseña a una única frecuencia. Por otro lado, en la última etapa de optimización de la bocina tipo spline es inevitable que el nivel de adaptación empeore un poco para poder mejorar la directividad, es importante señalar que el nivel de adaptación obtenido sigue siendo mejor que el de la bocina sectorial clásica. Por lo tanto, y con el fin de obtener mejores resultados en un diseño construido, se ha escogido este último diseño como el diseño final. Cabe señalar que, en este último diseño los valores de SLL obtenidos son:

- SLL en el plano $\phi = 0$ para 81,5 GHz: -17,13 dBi.
- SLL en el plano $\phi = 0$ para 85,3 GHz: -18,67 dBi.

Por último, en la Figura 2-18 se muestra el perfil final obtenido.

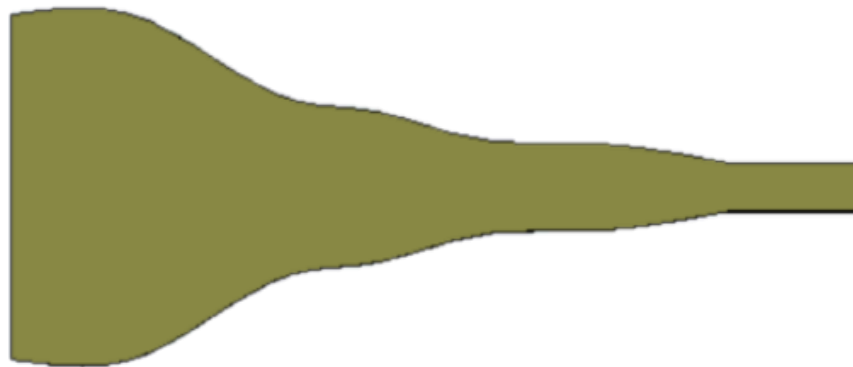


Figura 2-18: bocina sectorial plano H con perfil spline final.

2.5 Análisis de convergencia de la bocina

En esta sección se lleva a cabo un análisis de la convergencia de los resultados obtenidos en el modelo final de la bocina sectorial plano H. Para obtener los resultados, se ha llevado a cabo un barrido del mallado que el software CST aplica a la estructura cuando se simula con el *Time Domain Solver*.

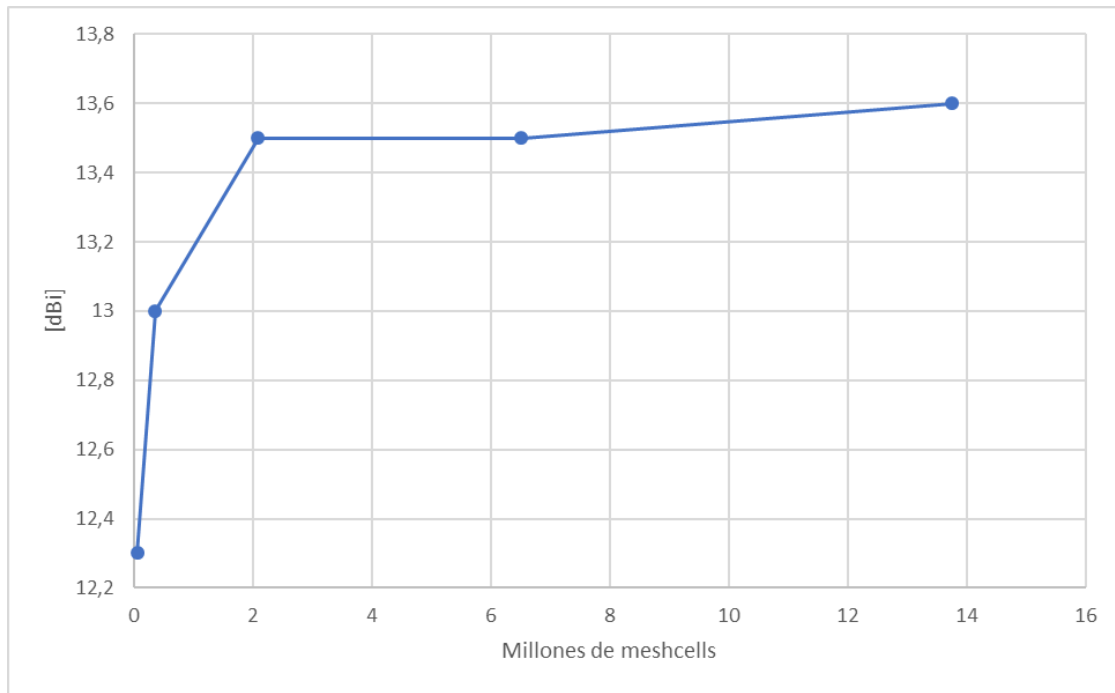


Figura 2-19: análisis de la directividad en función del mallado utilizado. $f = 81,5$ GHz.

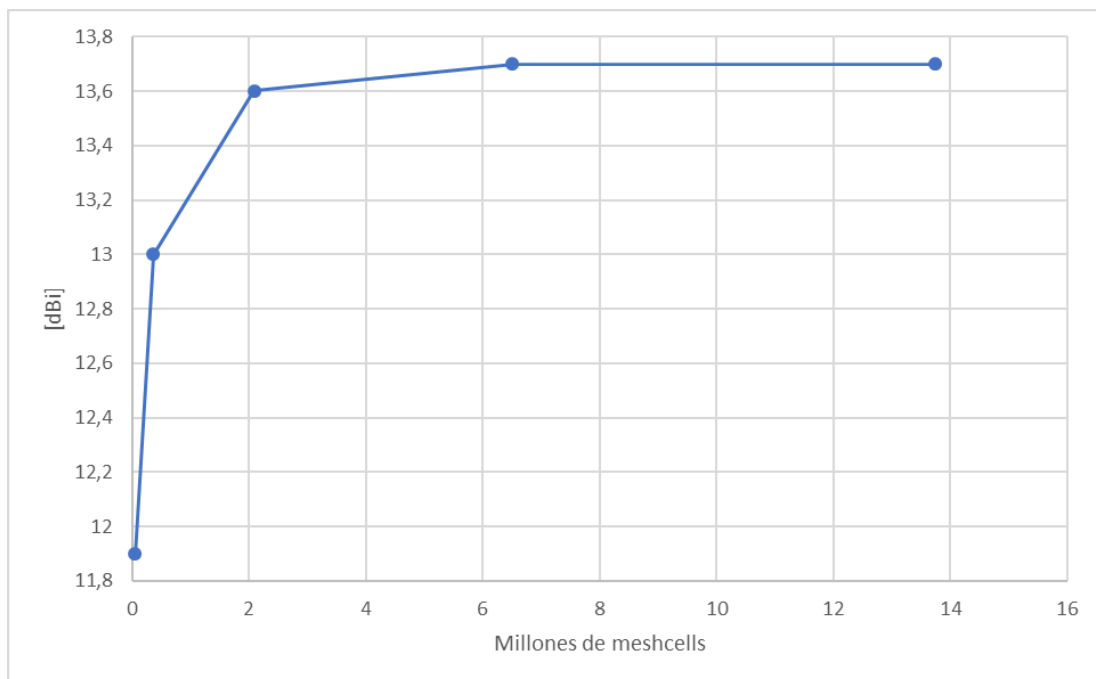


Figura 2-20: análisis de la directividad en función del mallado utilizado. $f = 85,3$ GHz.

En la Figura 2-19 y en la Figura 2-20 es posible observar cómo la directividad se estabiliza a partir de los dos millones de *meshcells* y, por tanto, se puede decir que los resultados han convergido. El mismo efecto se puede observar en la Figura 2-21, en la Figura 2-22 y en la Figura 2-23, donde tanto la adaptación de la bocina como los diagramas de radiación no varían una vez que se han alcanzado los dos millones de *meshcells*.

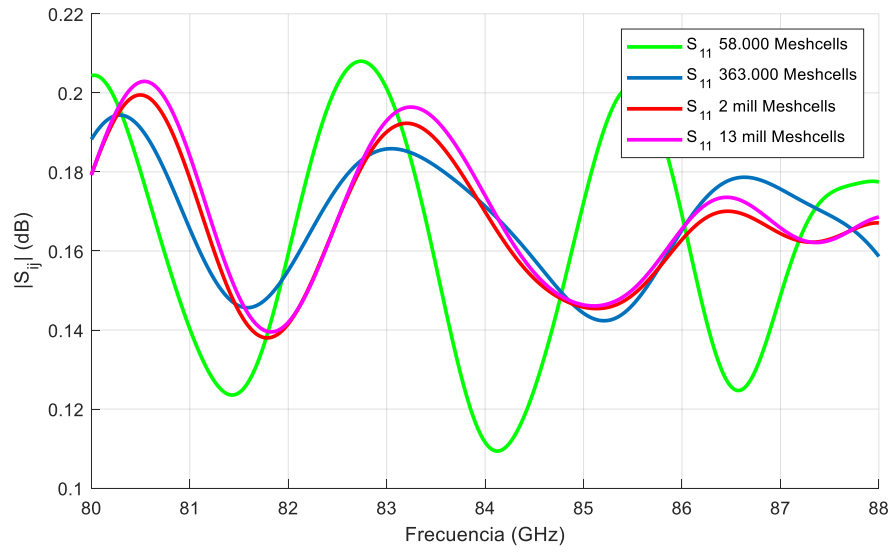


Figura 2-21: módulo del parámetro S11 de la bocina para mallados de distinta resolución.

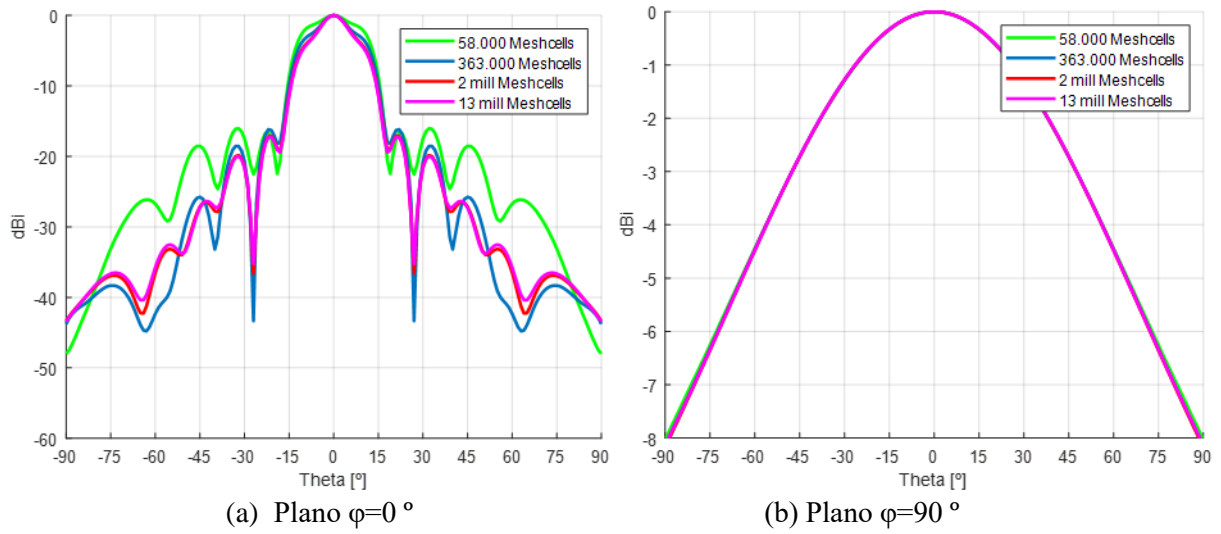


Figura 2-22: diagrama de radiación de la bocina para mallados de distinta resolución. $f = 81,5$ GHz.

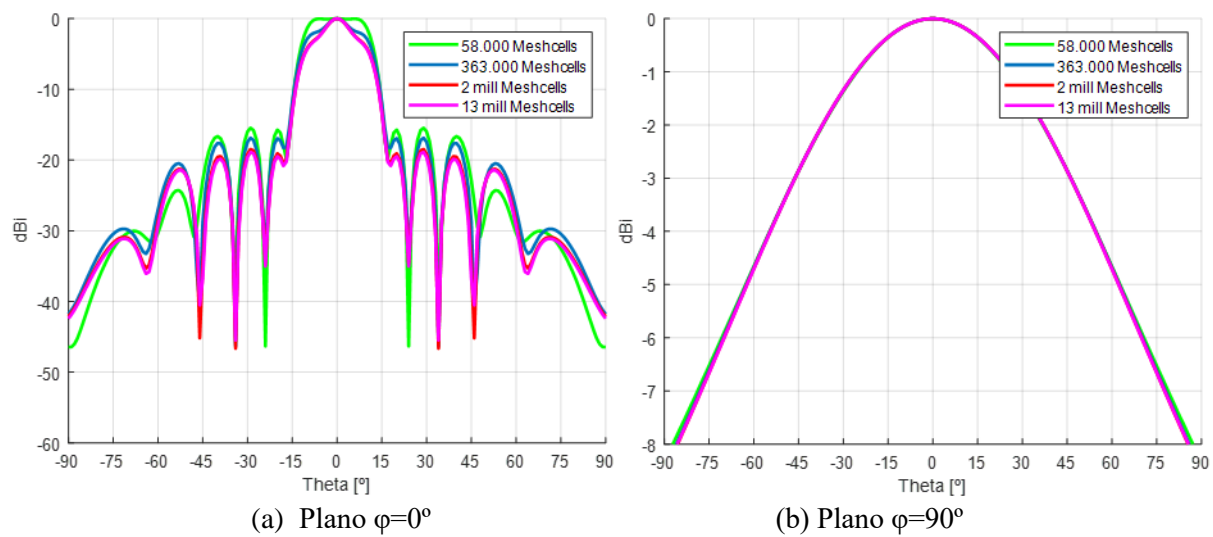


Figura 2-23: diagrama de radiación de la bocina para mallados de distinta resolución. $f = 85,3$ GHz.

3 Diseño del diplexor

3.1 Introducción

El siguiente punto para tratar en esta memoria es el diseño de la red de alimentación que poseerá el sistema. Antes de comenzar con los apartados de diseño, es importante introducir adecuadamente este elemento: el diplexor.

Los diplexores son elementos pasivos que se encargan de realizar multiplexaciones en el dominio frecuencial [21]. El diplexor se encarga de multiplexar frecuencialmente dos puertos en uno. Sin embargo, es posible aplicar esta operación a más de dos puertos. En el caso de que tengamos tres puertos en uno, se llama triplexor y, si tenemos cuatro puertos, se llama quadplexor.

El diplexor es un elemento que permite a dos dispositivos compartir un mismo elemento de comunicación. Por ejemplo, este elemento se utiliza comúnmente para conectar un transmisor y un receptor a una única antena. El caso más conocido es el de las antenas multibanda presentes mayoritariamente en estaciones base [24]. En este ejemplo, la señal de dos dispositivos se combina a partir de una diferenciación de la banda de frecuencia de trabajo para usar una misma antena en el enlace de subida a una frecuencia y en el enlace de bajada a otra frecuencia. El objetivo de este Trabajo Final de Máster ha sido el diseño de un diplexor de transmisión-recepción para una estación base 5G.

Tal y como se ha comentado anteriormente, este dispositivo debe componerse de una estructura capaz de separar las bandas de interés y transmitir las por diferentes salidas con la mínima atenuación en la banda especificada. La disposición básica con la que contará el diplexor se muestra en la Figura 3-1.

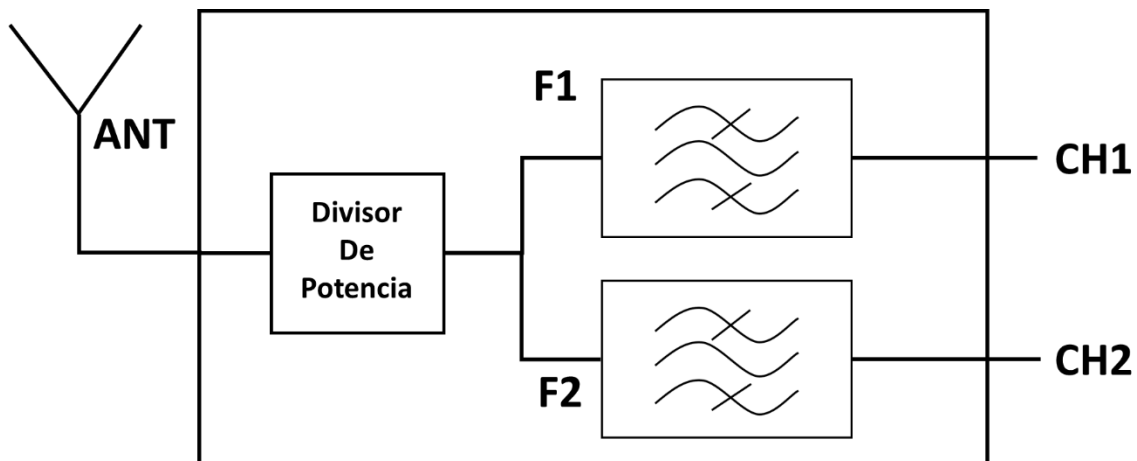


Figura 3-1: esquema del diplexor.

Como se puede apreciar, el dispositivo se compone de dos filtros paso banda centrados a frecuencias distintas y de un divisor de potencia que presentará dos funciones: por un lado, repartir la potencia por igual entre ambos filtros y, por otro, lograr aislar los rebotes de la señal de un filtro respecto a otro para que a uno no le afecte el funcionamiento del otro.

A la hora de diseñar el diplexor se barajaron dos posibles configuraciones: unión en T plano E (Figura 3-2 a) y unión en plano H (Figura 3-2 b). En ambos casos los filtros a utilizar serían los mismos. Debido a buscar minimizar la dificultad de la fabricación, en este proyecto se ha optado por la opción en plano H. De esta forma, toda la estructura poseerá la misma altura.

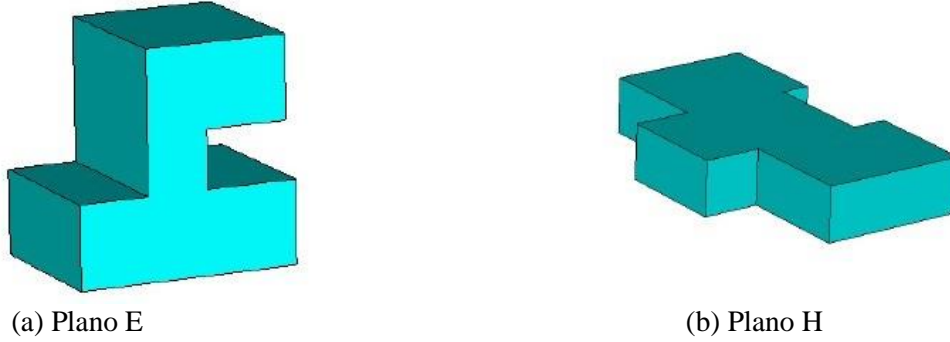


Figura 3-2: configuraciones de unión en T de tres puertas [25].

3.2 Diseño de los filtros

En esta sección se abordará el diseño de los filtros paso banda que se utilizarán en el diplexor. Como ya se ha indicado en la sección anterior, este proyecto se apoya en dos filtros paso banda centrados a frecuencias distintas (frecuencia de transmisión y recepción). Para la elaboración de los filtros se ha escogido la aproximación de Chebychev [20].

El primer paso fue fijar las especificaciones para los filtros a implementar. En este sentido, con el fin de, por un lado, permitir la recepción de la señal entrante y, por otro, transmitir la máxima potencia, el dispositivo debe tener pérdidas de inserción bajas. En este proyecto, se ha definido que en toda la banda de paso debe tener una adaptación mejor o igual a 20 dB y pérdidas de inserción mejores de 0,2 dB. Las bandas fijadas han sido la banda inferior de 81,1 GHz a 82,1 GHz y la banda superior de 84,7 GHz a 85,7 GHz, bandas que serán utilizadas para la transmisión de datos entre estaciones base 5G [6], [8]. Una vez se han fijado las especificaciones, el primer paso ha sido obtener el mínimo orden del filtro que consigue cumplir con las especificaciones acordadas. En este caso se trata de un orden cuatro. Para comprobar que cumple con las especificaciones, se ha realizado un primer modelo con elementos concentrados tal y como se muestra en la Figura 3-3.

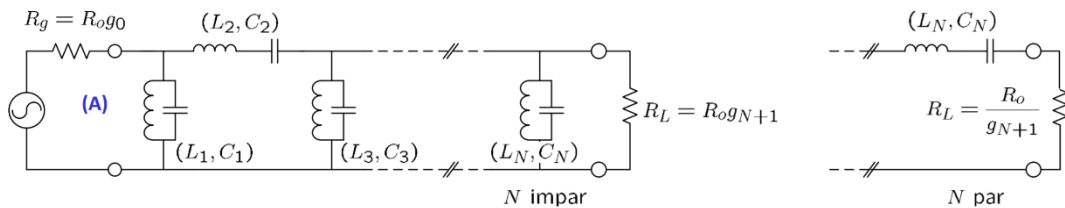


Figura 3-3: configuraciones filtro elementos concentrados [20].

El comportamiento del circuito se ha simulado mediante un *script* y los parámetros S obtenidos se muestran en la Figura 3-4.

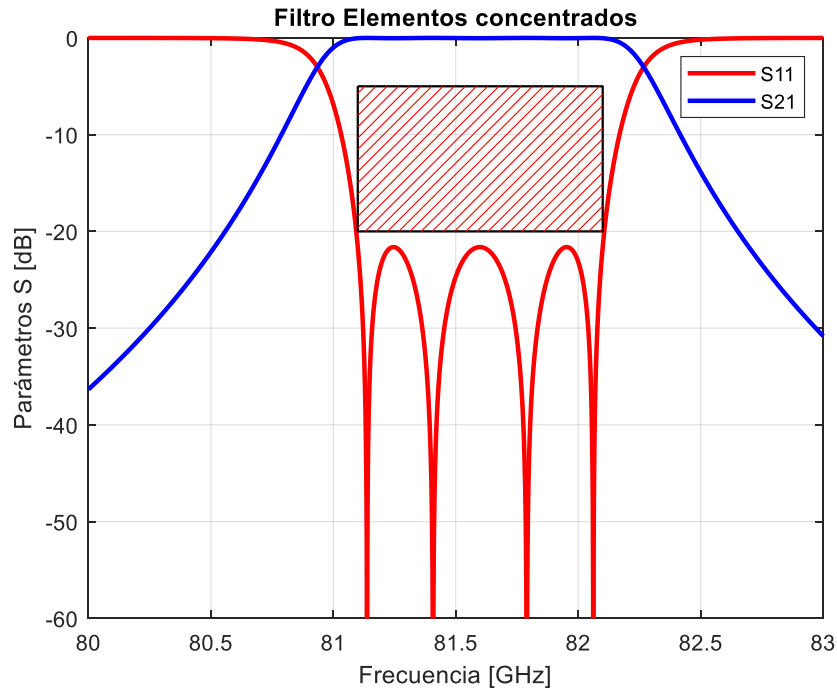


Figura 3-4: resultado filtro elementos concentrados banda inferior con máscara a -20 dB.

Una vez se ha demostrado que el orden del filtro puede satisfacer las especificaciones requeridas, se ha procedido al siguiente paso: la elaboración de los filtros paso banda mediante un diseño con resonadores serie en la rama serie empleando, además, líneas en $\lambda/2$ e inversores ideales, tal y como se muestra en la Figura 3-5.

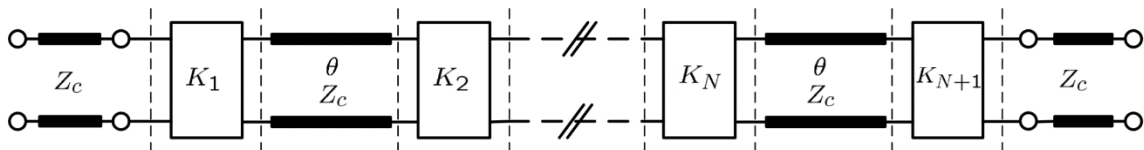


Figura 3-5: configuración de un filtro de resonadores serie en la rama serie utilizando líneas $\lambda/2$ e inversores ideales [20].

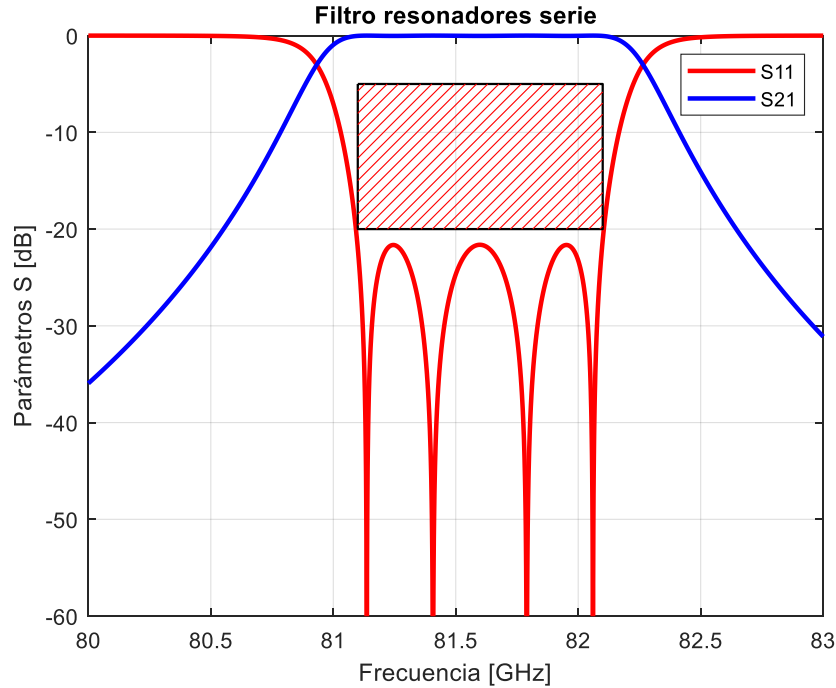


Figura 3-6: resultado filtro resonadores serie en la rama serie utilizando líneas $\lambda/2$ e inversores ideales.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 3-6 no existe apenas variación entre la configuración con elementos concentrados y con resonadores. Estas pruebas se han realizado tanto para la banda inferior como la superior sin encontrar problema ninguno. A continuación, se va a proceder a sustituir los inversores por iris en guía de onda, de tal forma que se corrigen las longitudes de las cavidades según la corrección de los inversores. Una vez se conoce el valor del inversor de impedancias normalizado: $K[\Omega]$ normalizado se puede, a través de la creación de la tabla de inversores a la frecuencia de diseño, obtener la anchura del iris a la que corresponde el inversor. Además, mediante el valor de la anchura del iris, es posible calcular la longitud eléctrica de la línea a cada lado del inversor para corregir la longitud de las cavidades. Con todo esto, se obtienen las dimensiones del filtro a diseñar.

Una vez se dispone de todas las dimensiones de los filtros a realizar, se calcula la respuesta de los filtros finales. Para ello, se ha utilizado el método de análisis modal [12] (*Mode-Matching* en inglés). Así, se ha obtenido la matriz de dispersión que relaciona las amplitudes de los modos incidentes y reflejados a ambos lados de la discontinuidad con las amplitudes de los modos incidentes también a ambos lados.

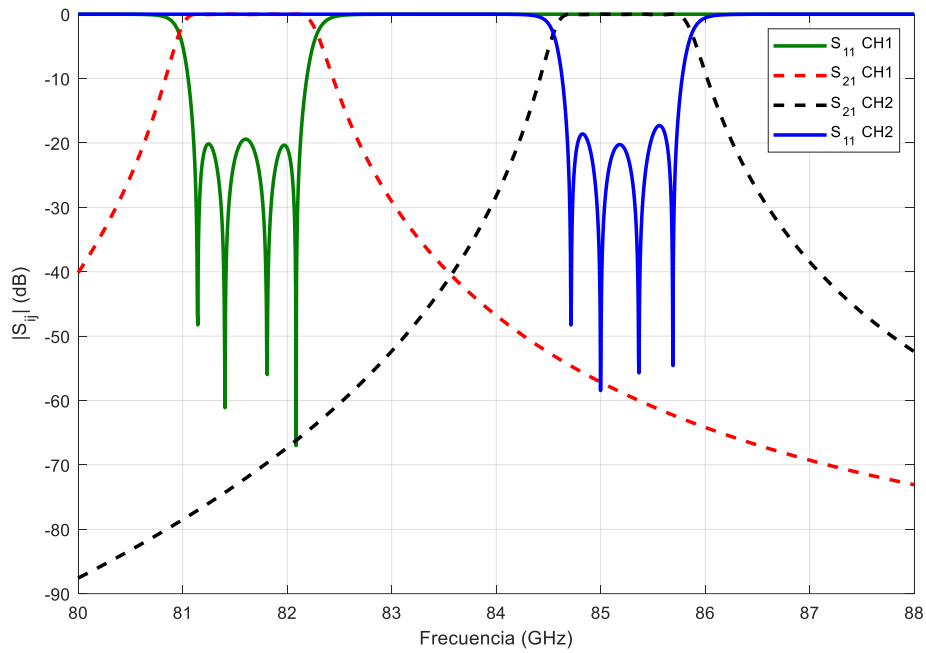


Figura 3-7: resultado de los filtros superpuestos utilizando *Mode-Matching*.

En la Figura 3-7 se puede apreciar cómo el filtro del canal dos (banda superior) no cumple con el nivel de coeficiente de reflexión requerido, menor que -20 dB. Para cumplir con dicho objetivo se ha llevado a cabo un proceso de optimización en *Mode-Matching*. Se ha diseñado una función de coste en la banda a optimizar de tal manera que esta llegue a cero cuando se obtenga el objetivo en el que en toda la banda el coeficiente de reflexión sea inferior a -20 dB. Con esta función de coste y el uso de un algoritmo de optimización simplex, se han obtenido los resultados de la Figura 3-8.

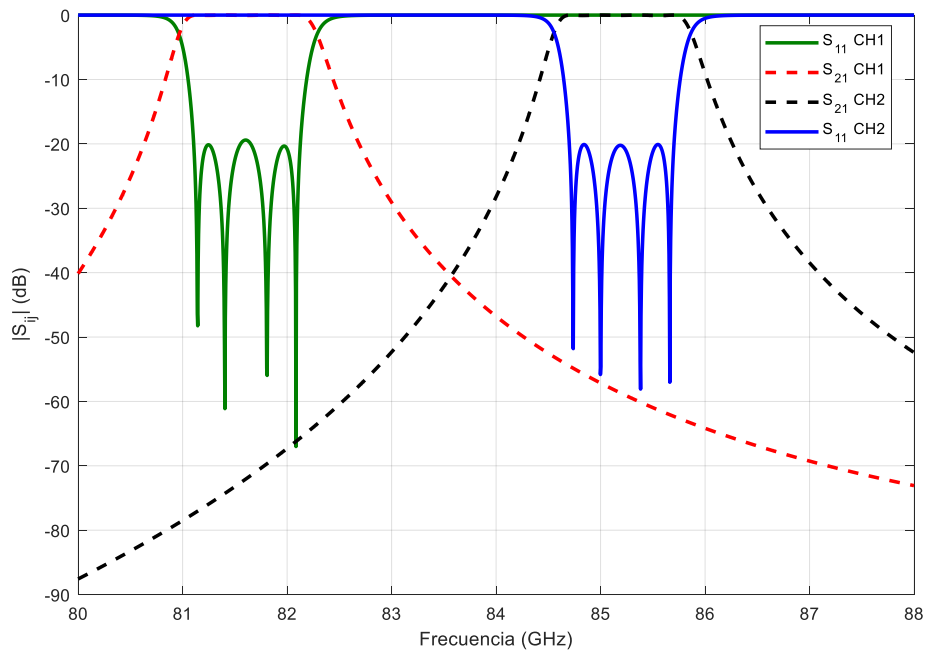


Figura 3-8: resultado de los filtros optimizados utilizando *Mode-Matching*.

Gracias al proceso de optimización llevado a cabo, se puede observar cómo ahora la banda superior o canal dos presenta un coeficiente de reflexión en toda la banda por debajo de -20 dB. Las dimensiones finales que presentarán los filtros son las que se muestran en la Tabla 3-1.

Dimensiones	CH1 [mm]	CH2 [mm]
Altura guía	1,27	1,27
Ancho guía	2,54	2,54
Grosor irises	0,82	0,82
Ancho iris 1	1,453	1,514
Ancho iris 2	1,036	1,09
Ancho iris 3	0,984	1,035
Longitud cavidad 1	1,877	2,04
Longitud cavidad 2	2,131	2,316

Tabla 3-1: dimensiones filtros pasa banda.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de ambos filtros, se han simulado ambos dispositivos en CST. El aspecto final del filtro es el que se muestra en la Figura 3-9.

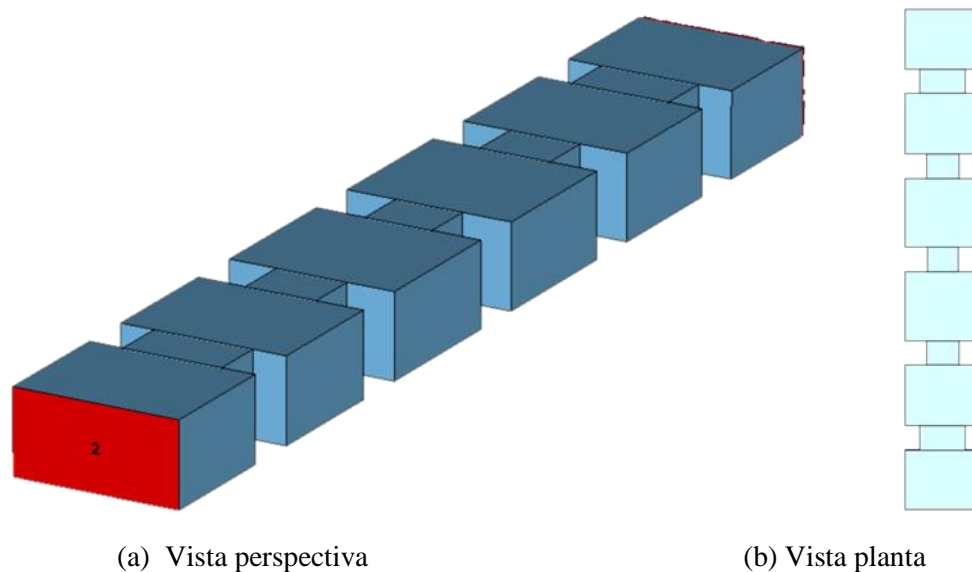


Figura 3-9: representación del filtro paso banda.

Una vez modelados ambos filtros en la herramienta de simulación CST, se simulan mediante el *Frequency Domain Solver*. Los resultados son los que se muestran en la Figura 3-10, donde se puede observar cómo la respuesta del módulo de los parámetros S21 y S11 del filtro es casi idéntica a la respuesta de los filtros simulada mediante *Mode-Matching*. Las respuestas de ambos filtros se muestran superpuestas.

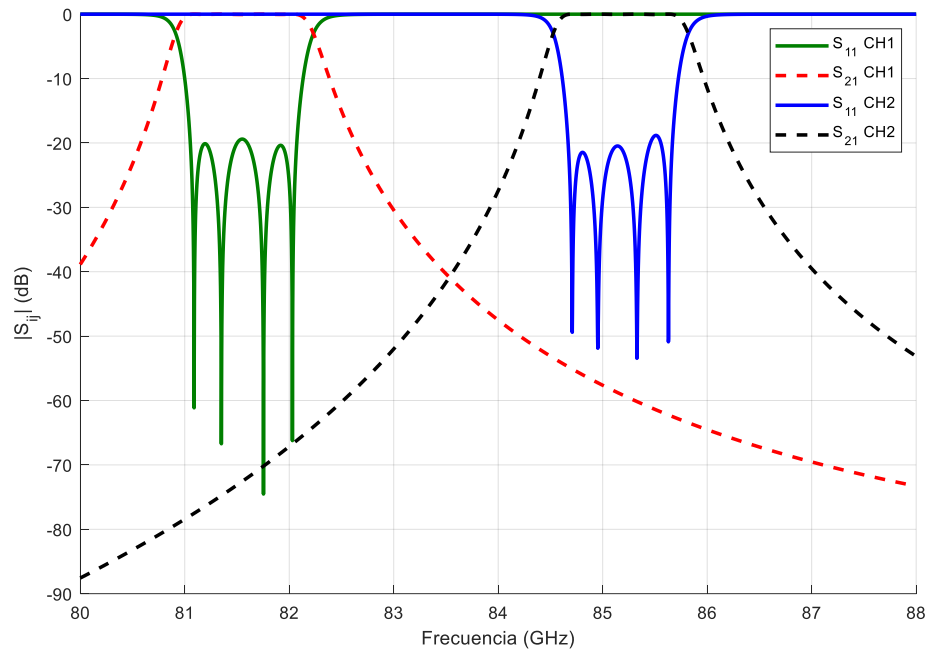


Figura 3-10: respuesta de los filtros paso banda en CST.

3.3 Unión en T

A continuación, se va a explicar la metodología utilizada en el diseño de la unión en T [21]. Anteriormente, se ha explicado que el sistema debe ser capaz de separar las dos bandas de interés y transmitir las por dos salidas diferentes de tal forma que se consiga la máxima transferencia posible en la banda deseada y la máxima atenuación posible en las otras bandas del espectro. La estructura básica del diplexor se compone de dos filtros paso banda centrados en dos frecuencias distintas y un divisor de potencia que une ambos elementos (ver Figura 3-1). Este divisor de potencia tiene dos funciones principales: el divisor debe repartir la potencia en partes iguales entre los dos filtros y, además, debe lograr el máximo grado de aislamiento entre ambos filtros para evitar que la señal de uno pueda perturbar al otro filtro.

Existe una amplia variedad de divisores de potencia, pero este proyecto se centrará en una de ellas: la unión en T (ver Figura 3-11).

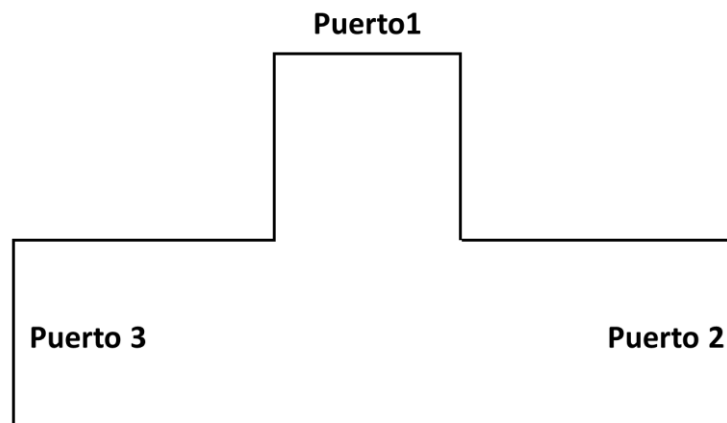


Figura 3-11: divisor en T.

Este elemento es un divisor de potencia de tres puertos que destaca por ser recíproco, sin pérdidas y porque uno de sus puertos está desadaptado. En este caso se ha realizado un divisor en T en guía de onda. El tipo de guía de onda más utilizada para este caso es el de guía rectangular, donde la unión en T, como ya se comentó, se puede realizar en plano E o en plano H. En este proyecto se ha usado la configuración en plano H para facilitar la construcción del modelo.

Para realizar este divisor de potencia en T y puesto que el objetivo es obtener una compensación inductiva, se va a introducir un diafragma o iris en guía de onda con efecto inductivo. Para ello, se realiza un estrechamiento de las paredes que forman la anchura de la guía. Como se puede ver en la Figura 3-12, para obtener una correcta distribución de la potencia y mejora de adaptación, se ha introducido un iris simétrico y otro asimétrico. Además, en la siguiente representación se muestran todos los parámetros que han sido utilizados para la optimización del divisor de potencia.

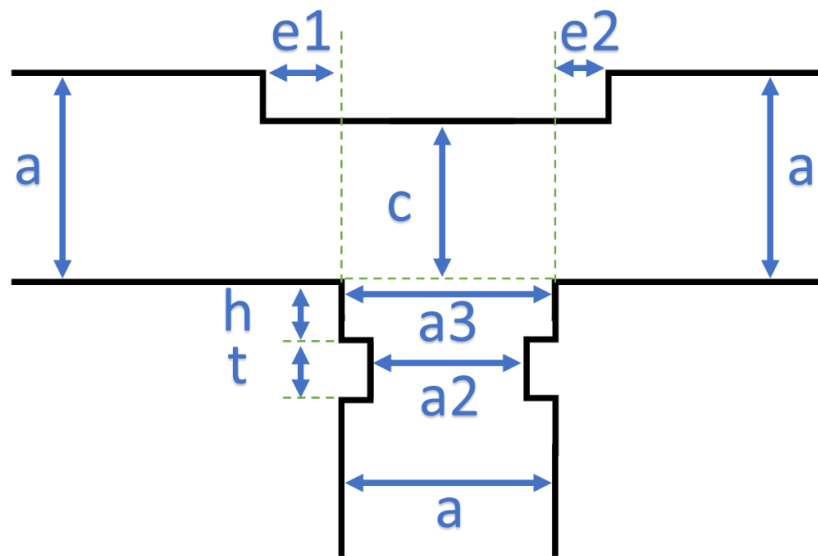


Figura 3-12: divisor en T compuesto de dos iris inductivos.

La optimización de este elemento a través de la herramienta de software CST requería procesos de simulación muy largos, ya que para llevar a cabo una simulación precisa era necesario emplear mucho tiempo. Con el fin de subsanar este problema, se utilizó un software FEM-2D (*Finite Element Method*), desarrollado en el grupo de investigación. Este software permite analizar de una manera mucho más eficiente estructuras de guía de onda en plano H.

Gracias al software desarrollado se consigue obtener de forma más rápida la matriz de dispersión del dispositivo. En la Figura 3-13 y en la Figura 3-14 se puede observar el aspecto final del diplexor: el divisor de potencia junto con los filtros.

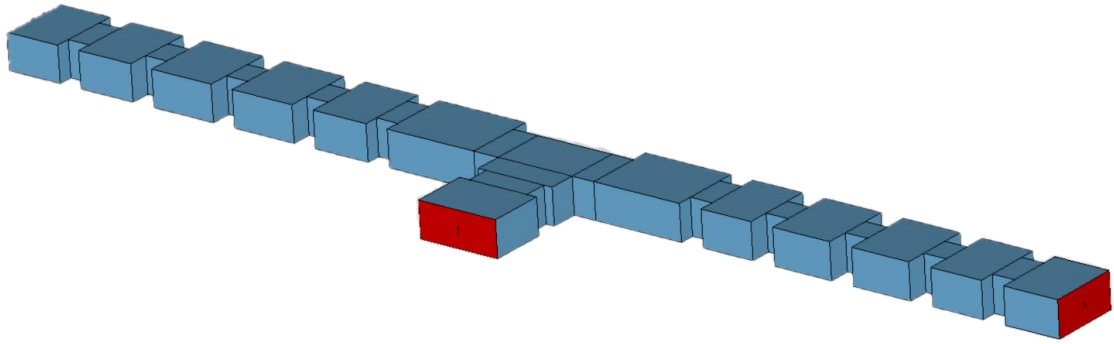


Figura 3-13: aspecto final del diplexor. Vista en perspectiva.

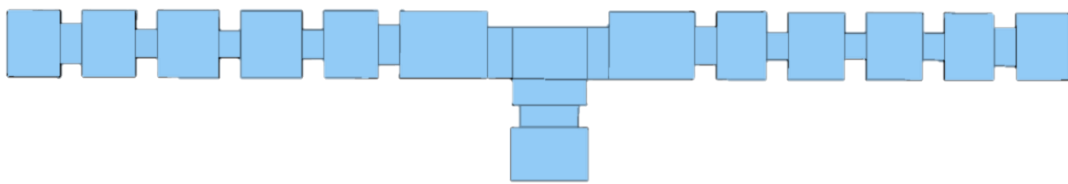


Figura 3-14: aspecto final del diplexor. Vista en planta.

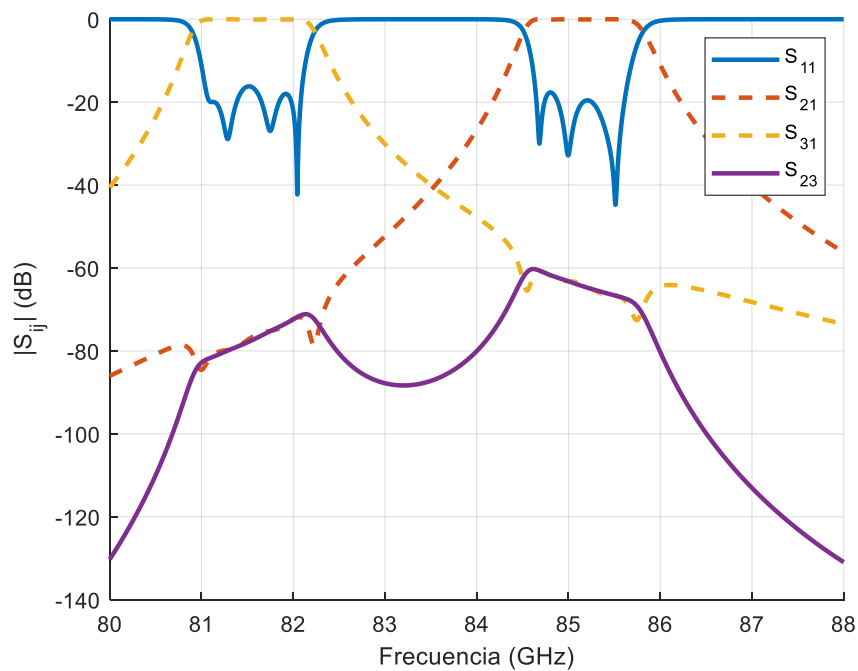


Figura 3-15: respuesta del diplexor.

Después de todo el proceso de optimización, la respuesta final obtenida es la que se muestra en la Figura 3-15, donde se puede observar que el nivel del módulo de parámetro S_{11} del diplexor no se encuentra por debajo de los -20 dB requeridos en las bandas especificadas. Por otro lado, cabe destacar que el nivel de transmisión alcanzado y el aislamiento entre los dos filtros es bueno y se llega a obtener valores de aislamiento siempre por debajo de los -60 dB. Además, se ha logrado en ambos canales un ancho de banda

fraccional de 1,10 % y una separación entre canales fraccional de 4,40 %. Afinar los resultados requeriría una optimización en conjunto del filtro junto con la unión T. El diseño y optimización de un diplexor es una tarea compleja la cual se sale de los objetivos de este proyecto. Es por esto por lo que, tras este estudio preliminar sobre los diplexores, se ha utilizado para el diseño final de la antena un diplexor diseñado con anterioridad en el grupo RFCAS.

3.4 Modelo diplexor RFCAS

Después de haber realizado el diseño y la implementación de un diplexor funcional para las bandas especificadas se procederá a realizar una breve comparación del diseño realizado con uno desarrollado por el grupo de investigación RFCAS. Cabe destacar que se trata de un dispositivo diseñado para banda Ka por lo que para su comparación lo primero que se ha de realizar es un escalado de este a la banda deseada. Para llevar a cabo este proceso se modela el diplexor en Matlab para una simulación rápida. Para esto se hace uso del *script* realizado para simular estructuras en T. De esta forma y tras un largo proceso de readaptación, se modifica completamente el diplexor para que sea funcional en las bandas 5G especificadas. El resultado final de los módulos de los parámetros S del diplexor simulado en Matlab son los que se pueden observar en la Figura 3-16.

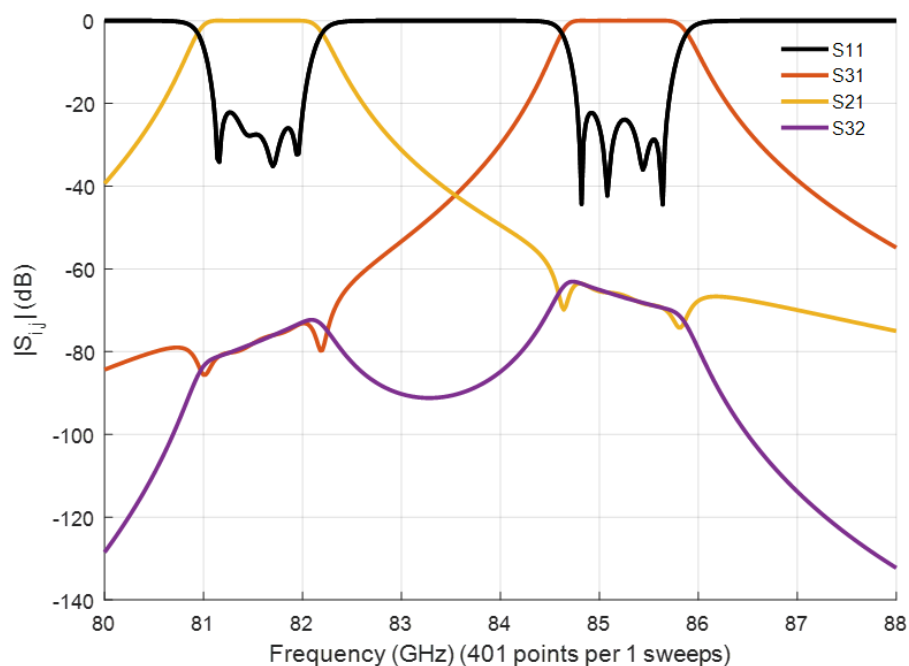


Figura 3-16: respuesta del diplexor en Matlab.

En la Figura 3-16 se puede observar cómo el nivel del módulo del parámetro S11 se encuentra por debajo de -20 dB. Con este nuevo modelo conseguimos las dos funciones principales de las que ya hemos hablado: repartir la potencia de igual manera entre los dos filtros y, además, lograr el máximo grado de aislamiento entre ambos filtros, de forma que se evita que la señal de uno pueda perturbar al otro. Además, gracias al nuevo nivel de adaptación, se logrará una correcta recepción de la señal entrante y transmitir la señal con la máxima potencia. El aspecto final del diplexor en CST es el que se muestra en la Figura 3-17 y en la Figura 3-18.

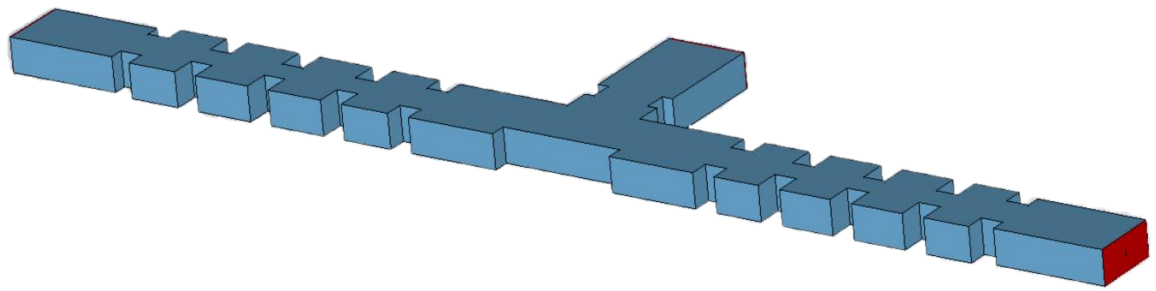


Figura 3-17: aspecto final del diplexor. Vista en perspectiva.

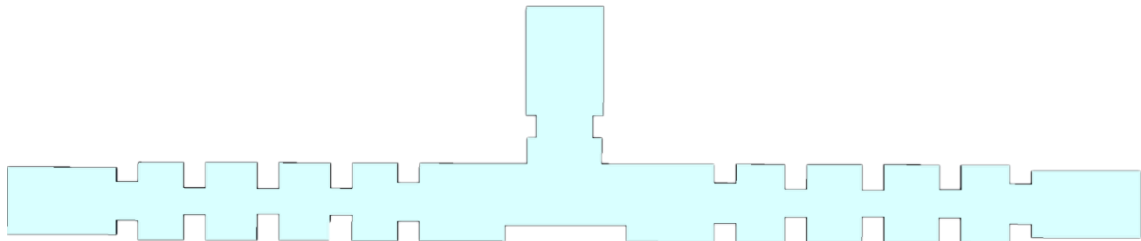


Figura 3-18: aspecto final del diplexor. Vista en planta.

Una vez importada la estructura en el software CST se realiza su simulación mediante el *Frequency Domain Solver*. Cabe destacar que, para obtener una buena convergencia de los resultados, ha sido necesario utilizar la opción que ofrece CST de mallado adaptativo. De esta forma, se fuerza a CST a utilizar el mismo mallado en las dos bandas de frecuencia empleadas para lograr la convergencia de los resultados. Los resultados son los que se muestran en la Figura 3-19.

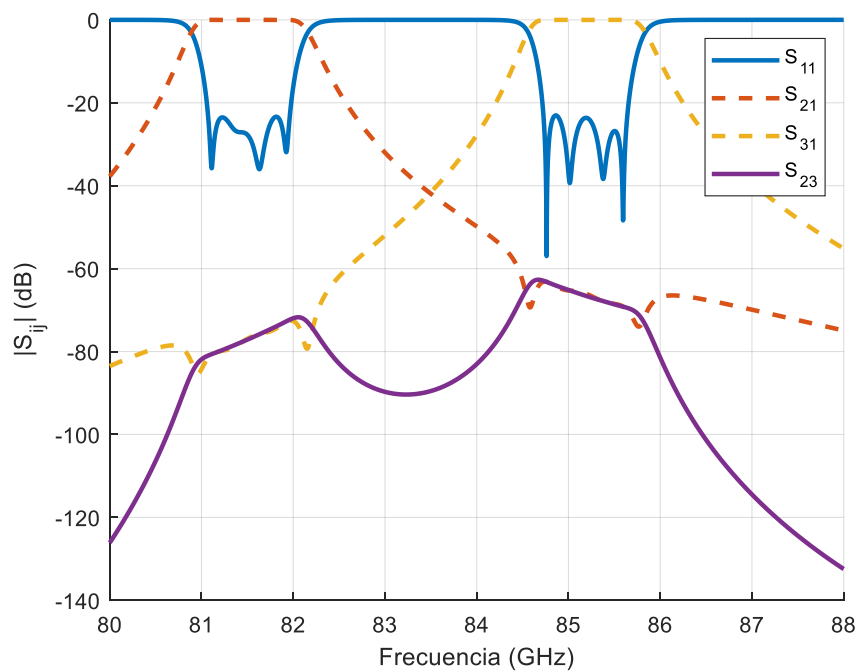


Figura 3-19: respuesta del diplexor en CST, *Frequency Domain Solver*.

Tal y como se puede apreciar, apenas existe variación entre los resultados obtenidos en Matlab (FEM-2D) y a través del software CST. Además, se ha logrado en ambos canales un ancho de banda fraccional de 1,14 % y una separación entre canales fraccional de 4,22 %. Por lo tanto, finalmente se ha podido corroborar que los resultados obtenidos son correctos.

3.5 Análisis convergencia diplexor

En esta sección se va a llevar a cabo un análisis de convergencia de los resultados obtenidos mediante CST en función del mallado utilizado. En primer lugar, como ya se ha explicado, la simulación de diplexor se realiza en *Frequency Domain Solver*. Este tipo de simulaciones emplea un mallado en el que se utilizan tetraedros. Para comprobar que los resultados han convergido, se ha incrementado el número de tetraedros por λ hasta que ya no hubiera variación en los resultados. Como se puede observar en la Figura 3-20, se han llevado a cabo tres simulaciones en las que se han utilizado distintos mallados. En esta representación, se puede comprobar cómo, después de haber utilizado un total de 161 847 tetraedros, la simulación con más mallado es igual a la anterior y, por tanto, los resultados han convergido. Para la realización de este análisis se ha empleado solamente la comparación del módulo del parámetro S11, ya que para el resto de los parámetros no eran tan sensibles y apenas se apreciaba variación.

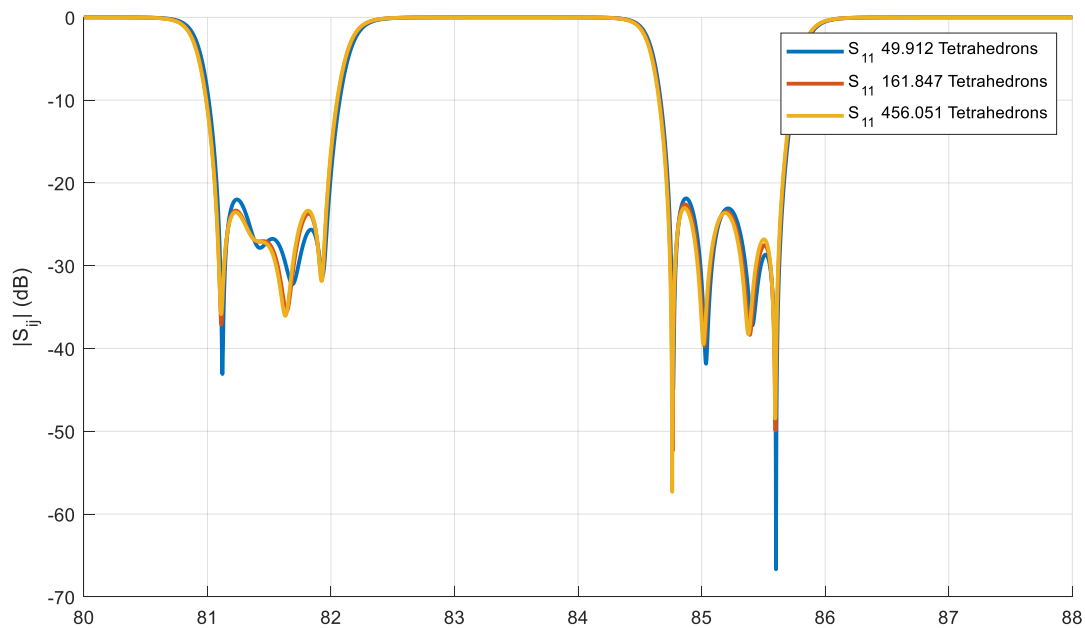


Figura 3-20: módulo del parámetro S11 para diferentes mallados.

4 Dispositivo completo

4.1 Introducción

En la sección anterior se han desarrollado los dos elementos principales que componen el sistema. Por un lado, se ha llevado a cabo el diseño de una bocina sectorial plano H, cuya función es ser el elemento radiante del sistema y, por otro lado, se ha implementado un diplexor. Este otro bloque, como ya se ha comentado, será el encargado de realizar la multiplexación de las dos bandas de frecuencia.

Ambos módulos se han diseñado de forma individual, pero teniendo siempre en cuenta los requisitos de compatibilidad para la unión de ambas partes. En este proyecto, ambos bloques se diseñaron para funcionar en la banda-W. Dentro de este margen, se propone hacer una segmentación en las dos bandas que ya se han especificado. Como se refleja en el capítulo 1, el objetivo de dicha fragmentación es poder utilizar una misma antena tanto para la transmisión como para la recepción para reducir los costes y el tamaño.

4.2 Diseño del bloque completo

En esta sección se va a explicar el proceso de unión y reoptimización de los bloques para obtener el diseño final. Debe recordarse que se dispone de dos bloques diferentes: la bocina (Figura 4-1 b) y el diplexor (Figura 4-1 a). Para cada dispositivo se muestra el aire correspondiente al interior de las guías que lo conforman.

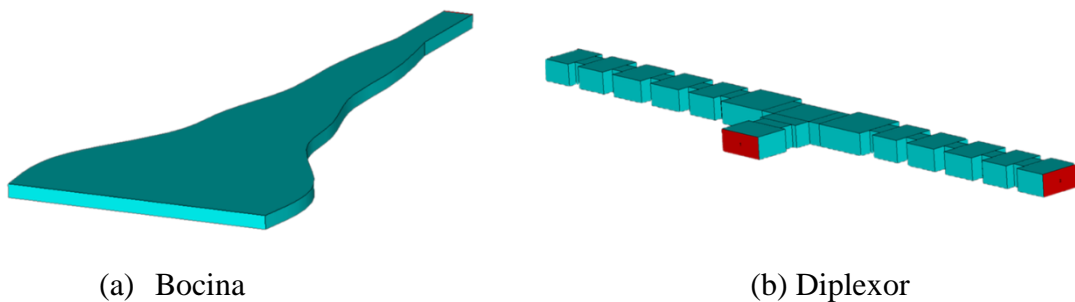


Figura 4-1: bloques del sistema

Para hacer posible la fusión de ambos elementos en uno, solo es necesario que el ancho de la guía de alimentación de la bocina sea igual al ancho de la guía de salida del diplexor. Este requisito se ha tenido en cuenta a la hora de optimizar la bocina, por lo que la unión de ambos dispositivos es totalmente compatible. Sin embargo, a la hora de preparar el dispositivo completo para un entorno real nos encontramos con dos problemas. Por un lado, la anchura de los puertos del diplexor no se adecua al ancho de una guía convencional WR10 y por otro, la alimentación del bloque debe hacerse desde la parte inferior del dispositivo por motivos de fabricación que se verán en el capítulo 5.

Para adaptar el ancho de las entradas del diplexor al de una guía WR10, se ha optado por el diseño de un transformador de guía multisección. De esta forma se consigue minimizar los efectos provocados por las discontinuidades manteniendo los niveles de adaptación y transmisión. Finalmente, debido a que la diferencia de anchura entre secciones era muy pequeña (del orden de 0,0145 mm) y prácticamente irrealizable para cualquier técnica de fabricación, se ha optado por una transición conformada (en inglés *tapered*). Este tipo de transiciones se caracteriza por variar una de sus dimensiones de forma progresiva hasta llegar al tamaño estándar requerido.

Una vez resuelto el primer contratiempo y adaptados los puertos a las dimensiones de la guía convencional WR10, se procede a abordar la alimentación desde la parte inferior del dispositivo. Para llevar a cabo esta tarea es necesario un codo en guía de onda de 90 °. Tras barajar varias alternativas y realizar un estudio en profundidad, se ha optado por el uso de un codo multiescalonado. Se ha elegido esta opción, en lugar de un codo achaflanado, de cara a facilitar una posible fabricación mediante la técnica *difusión bonding*, que se explicará más adelante, y segmentar lo menos posible la altura de la guía de todo el dispositivo.

El resultado final del conjunto se puede ver en la Figura 4-2 y en la Figura 4-3, donde se muestra la estructura interior que presenta el dispositivo.

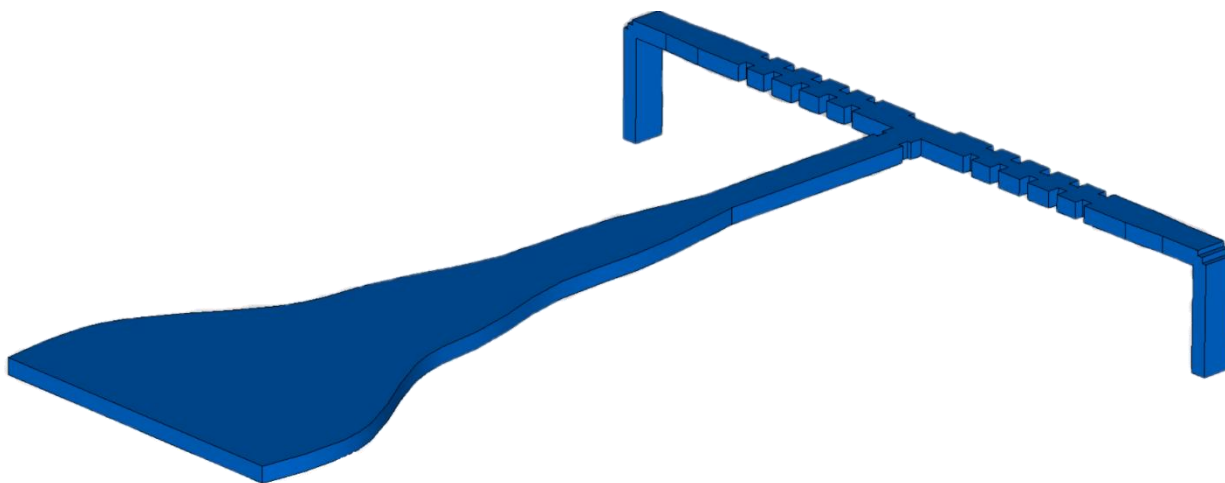


Figura 4-2: diseño completo del dispositivo. Vista en perspectiva.

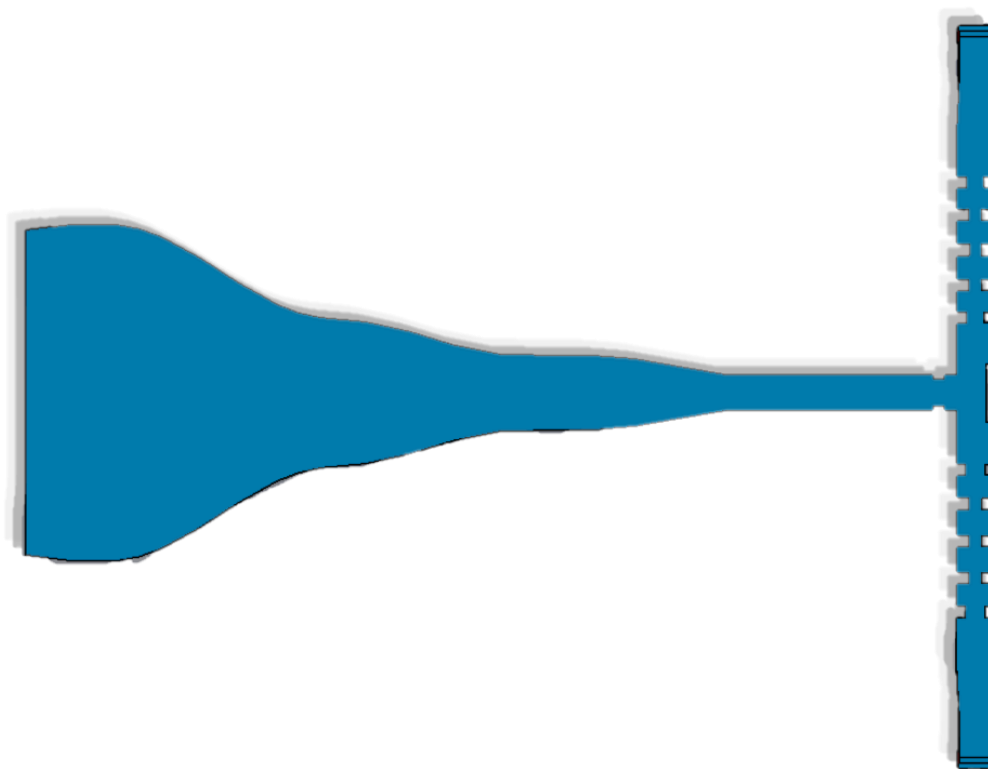


Figura 4-3: diseño completo del dispositivo. Vista planta.

Una vez se ha obtenido el diseño completo este se encapsula en un bloque de conductor eléctrico (ver Figura 4-4) para llevar a cabo las simulaciones.

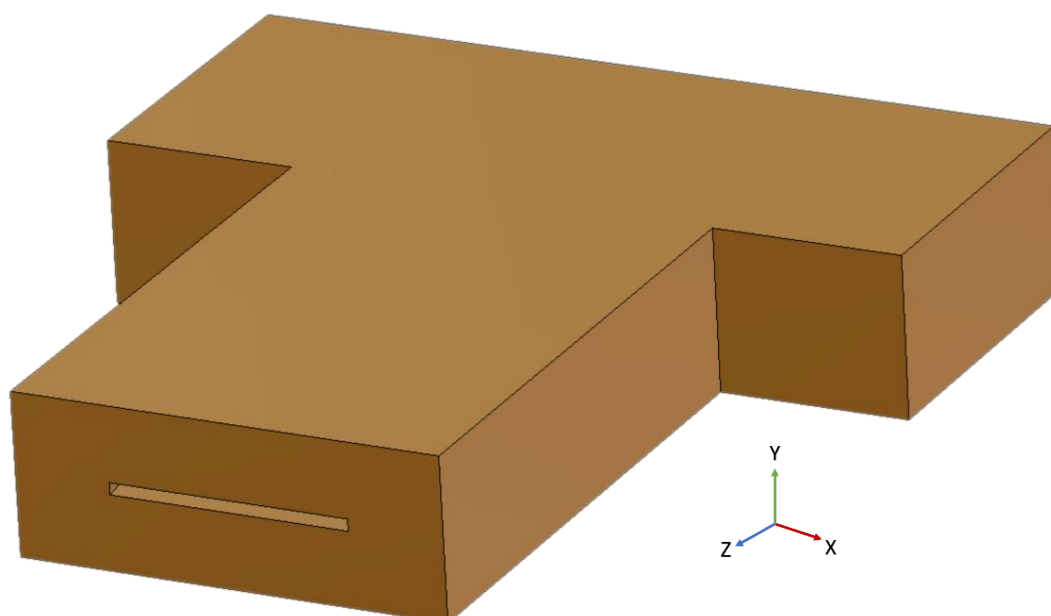


Figura 4-4: diseño completo del dispositivo bloque metálico. Vista en perspectiva.

4.3 Análisis electromagnético por bloques

Durante este capítulo se va a realizar un análisis electromagnético por bloques del dispositivo mediante el software CST. Para llevar a cabo esta simulación es necesario disponer de los diseños del diplexor y de la antena de bocina spline de forma individual. Además, deben usarse los bloques con una configuración de mallado suficiente, como se ha visto en la sección 2.5 y en la 3.5, para que las simulaciones converjan. En la Figura 4-5 se puede observar cómo queda la combinación circuital del dispositivo completo.

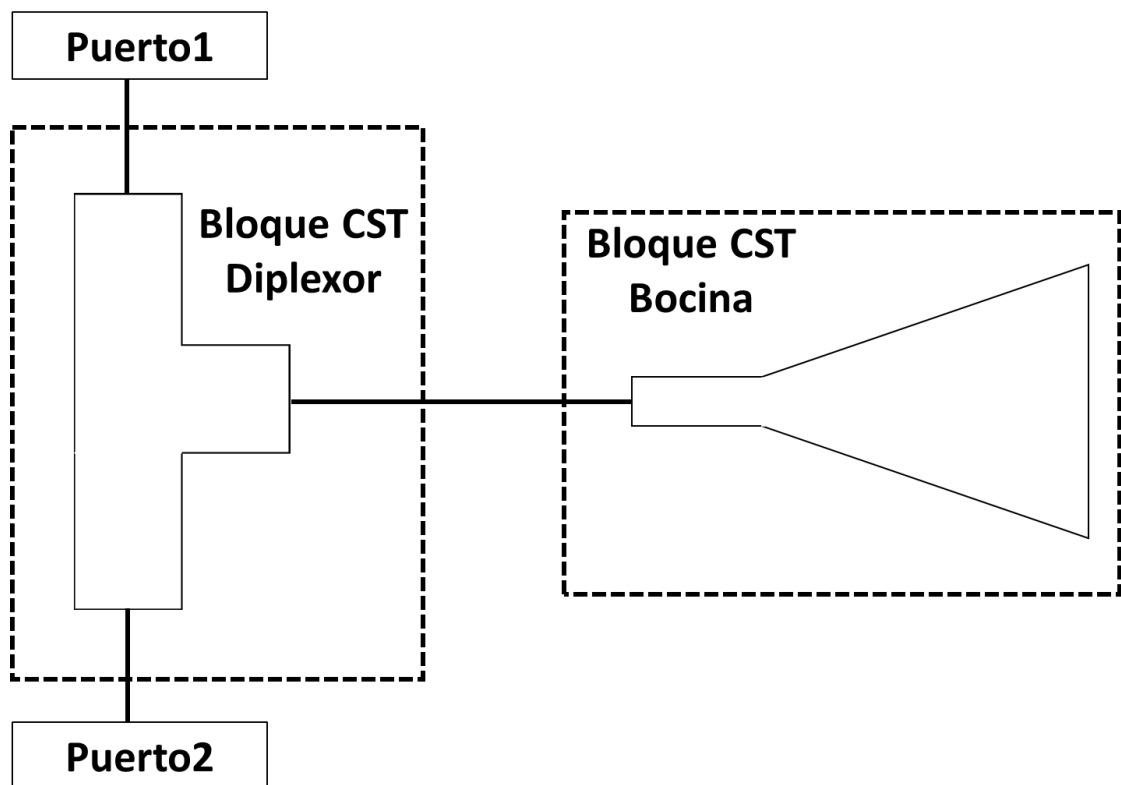


Figura 4-5: diagrama de la combinación circuital para obtener la respuesta del dispositivo completo.

Una vez configurado en CST el esquema circuital de los bloques del dispositivo, se procede a la simulación. Cabe señalar que mediante este método de simulación no se podrá obtener los diagramas de radiación del dispositivo completo, ya que la radiación será la misma que la de la bocina simulada de forma individual. Sin embargo, mediante este tipo de simulación se puede calcular la reflexión en los puertos de entrada del diplexor cuando la carga que se coloca en el puerto común no es una carga ideal, sino la bocina diseñada. En la Figura 4-6 se puede observar la adaptación de cada uno de los puertos, así como el aislamiento que hay entre ambas entradas.

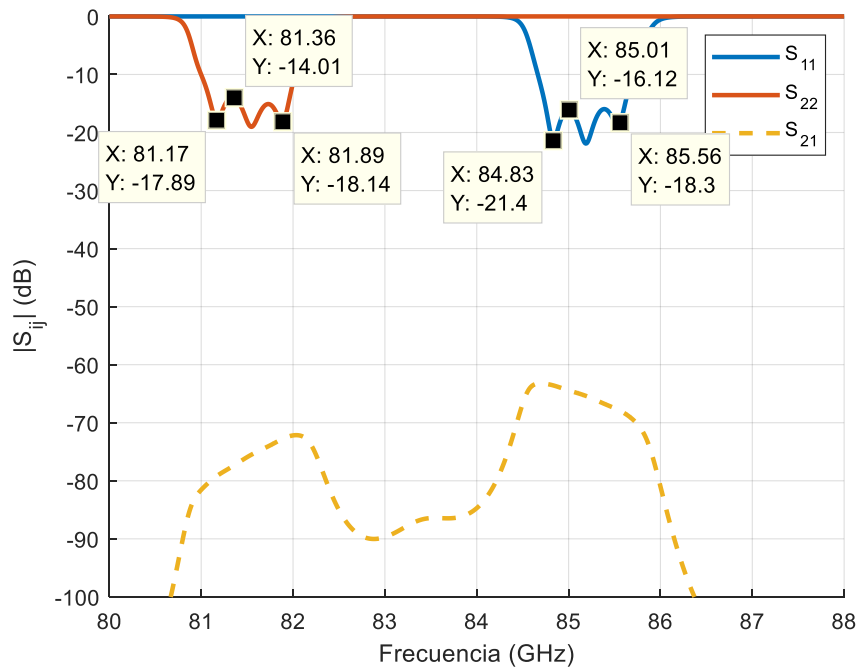


Figura 4-6: parámetros S de la simulación por bloques en CST.

En la Figura 4-6 se puede ver cómo la adaptación obtenida es peor que la conseguida en el diplexor. Esta degradación en el módulo de los parámetros S_{11} y S_{22} se produce por la adaptación conseguida en la bocina que, en este caso, actúa como carga en el puerto común del diplexor. Sin embargo, este comportamiento ya se esperaba debido a las diferencias en las adaptaciones de ambos bloques. Por último, se puede observar cómo el aislamiento presente entre los puertos de entrada del diplexor se mantiene con niveles muy buenos.

4.4 Análisis electromagnético del bloque completo

Una vez terminado el análisis electromagnético a través del conjunto de los bloques individuales que forman el dispositivo, se procederá al análisis del bloque completo importado en CST tal y como se mostraba en la Figura 4-4. El interior de la estructura queda encapsulado en el interior del bloque de tal forma que la apertura de la antena queda exactamente en el centro del bloque. En la Figura 4-7 se puede ver el módulo de los parámetros S de dicho bloque simulado en *Time Domain Solver* con 96 millones de *meshcells*.

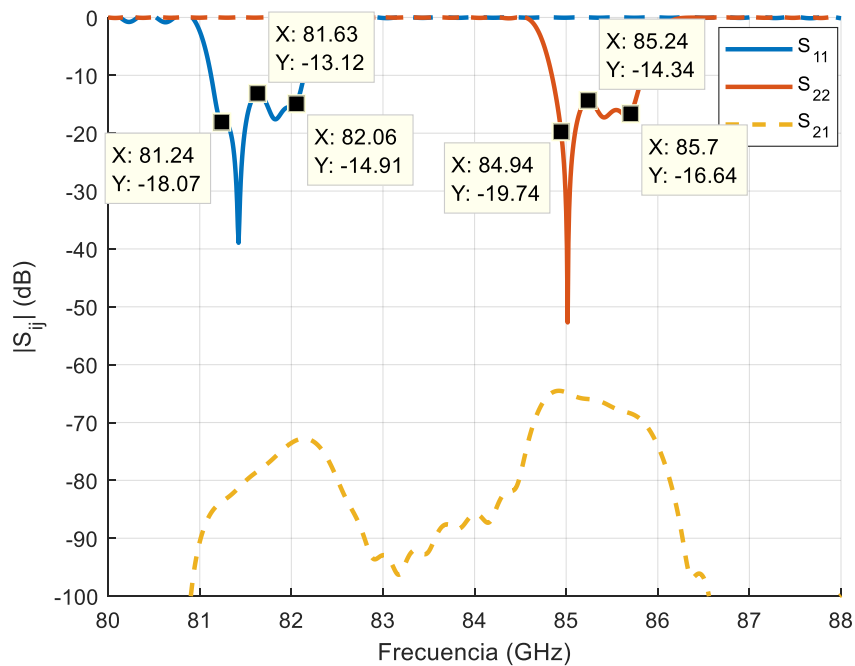


Figura 4-7: respuesta de la simulación del bloque entero en CST.

Para poder mostrar estos resultados ha sido necesario efectuar un análisis de convergencia de la respuesta de la estructura en función del mallado aplicado. Una vez terminado este análisis, se puede observar cómo los resultados obtenidos en la simulación del dispositivo completo se asemejan a los resultados obtenidos mediante la simulación por bloques mostrada en la Figura 4-6.

Por último, en la Figura 4-8 y en la Figura 4-9 se muestran los diagramas de radiación obtenidos para la frecuencia central de las bandas especificadas. En ambas figuras, si se presta atención al diagrama de radiación $\phi = 90^\circ$, se puede observar un pequeño rizado. Este corte $\phi = 90^\circ$ corresponde con el plano perpendicular al plano que forma la apertura de la bocina. Por esta razón, el rizado que aparece en el diagrama se debe a la altura del bloque de metal que actúa como plano de masa e interfiere en la radiación que la bocina provoca sobre ese plano. Este efecto se ha llevado a estudio, simulando la bocina en diferentes bloques con distintos tamaños para ver su efecto. Tras un gran número de pruebas, se ha decidido que la altura del bloque metálico que afecta en menor medida a la radiación y con la que se consigue una mayor directividad es una altura de ocho milímetros.

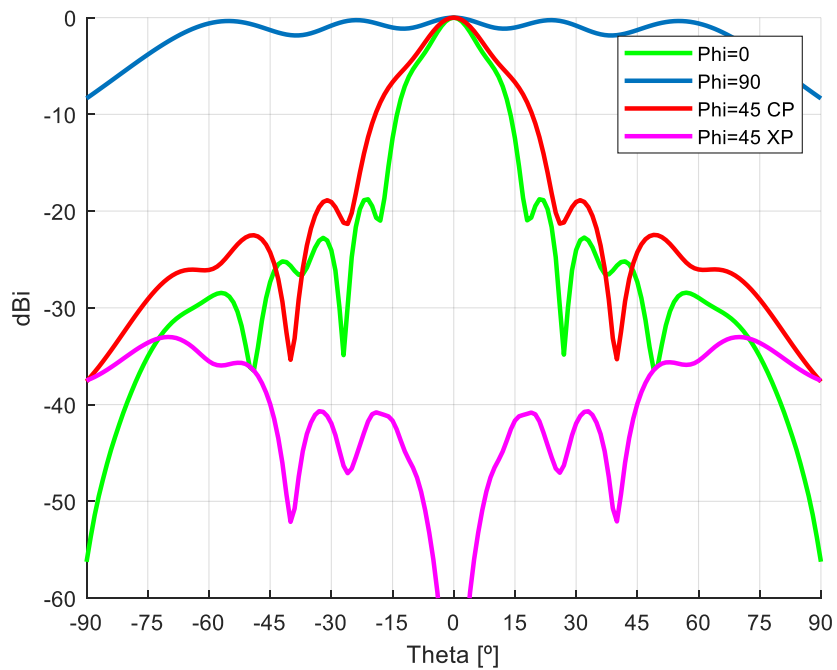


Figura 4-8: diagrama de radiación del dispositivo completo.
 $f = 81,5 \text{ GHz}$ D_0 : 13,2 dBi.

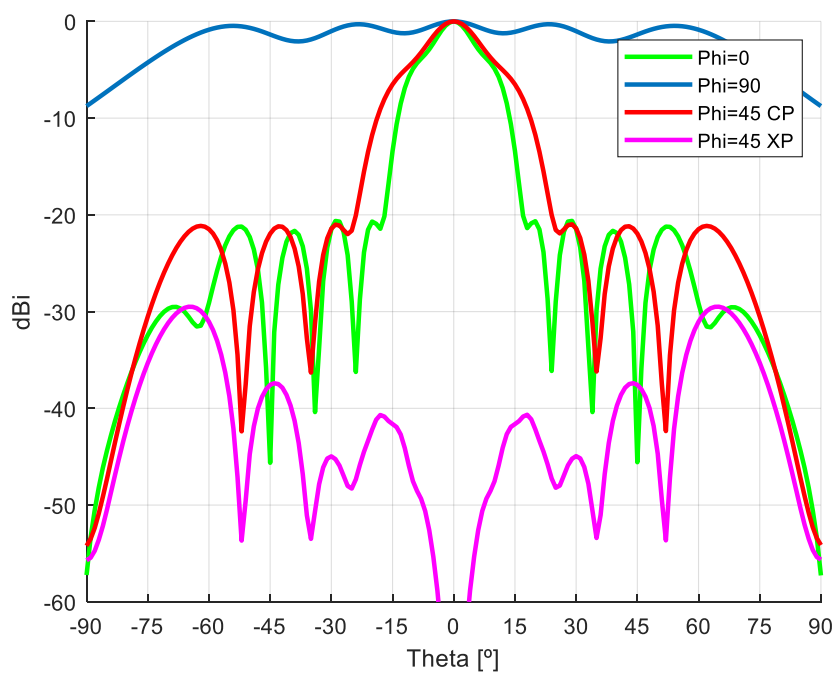


Figura 4-9: diagrama de radiación del dispositivo completo.
 $f = 85,3 \text{ GHz}$ D_0 : 13,4 dBi.

5 Fabricación

En este capítulo, se va a abordar el proceso de construcción del dispositivo dejando así atrás la fase de diseño y simulación. La fabricación del dispositivo diseñado ha sido uno de los mayores retos en este proyecto debido a la complejidad de la estructura. Cabe destacar que un pequeño error en las dimensiones a la hora de construir el dispositivo puede provocar cambios significativos en el comportamiento de este a causa de la banda en la que se trabaja, donde λ_0 es del orden de 3,5 mm.

Este capítulo tiene como fin mostrar las distintas técnicas de fabricación que se han considerado para este trabajo.

5.1 Diffusion Bonding

La primera propuesta de fabricación del dispositivo se basa en la técnica de fabricación conocida como *diffusion bonding*. Se trata de una alternativa a los procesos comunes de fabricación aditivos que se utilizan en la industria [26]. Durante los últimos años, esta técnica de fabricación se ha estudiado en profundidad para su aplicación en circuitos integrados [16]. Sin embargo, el uso de esta tecnología en la fabricación de antenas se está estudiando en la actualidad [17], [18]. Se han conseguido resultados para antenas 5G que trabajan en la banda-W [19].

Diffusion bonding es una técnica capaz de unir diferentes láminas metálicas en un bloque compacto gracias a la combinación adecuada de presión y temperatura por debajo del punto de fusión (ver Figura 5-1). Este proceso provoca el entrelazado de los átomos de la superficie de las placas que se quieren unir, de tal forma que se obtiene un enlace atómico entre ambas partes metálicas [26]. Mediante esta técnica, es posible obtener un bloque sólido sin la necesidad de alcanzar la temperatura de fusión del material. Las láminas para unir deben ser finas y planas de cara a que la superficie de contacto entre láminas sea máxima y facilitar de esta forma la unión de los átomos con la ayuda de la presión. El grosor típico de las láminas en *diffusion bonding* es de 0,2 o 0,3 mm. Además, apilar placas finas permite hacer uso de técnicas de gran precisión como *wire-cutting* o el ataque químico para mecanizar cada una de las láminas, los cuales proporcionan precisiones más altas que las técnicas tradicionales.

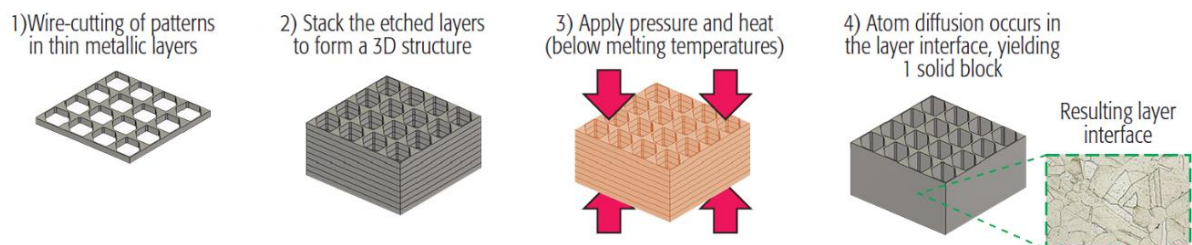


Figura 5-1: pasos involucrados en el proceso de fabricación *diffusion bonding*. [19]

La técnica de fabricación *diffusion bonding* es idónea para estructuras complejas como el dispositivo diseñado. Además, para bloques multicapas o estructuras plano H como la diseñada, donde toda la estructura presenta la misma altura, gracias al contacto eléctrico entre las láminas esta técnica garantiza un buen rendimiento de la antena. Por todo ello, el proceso de fabricación *diffusion bonding* es especialmente conveniente para este tipo de estructuras, y más si el dispositivo a fabricar opera en la banda de frecuencia milimétrica.

Como ya se ha comentado en el anterior capítulo, la alimentación del dispositivo debe hacerse desde la parte inferior de este. Para poder llevar a cabo esta tarea es necesario un codo en guía de onda de 90 °. Existe una amplia variedad de alternativas para codos en guía de onda, sin embargo, muchas de ellas dificultarían la fabricación del dispositivo debido a las achaflanados que presentan [19]. Con el fin de facilitar la fabricación mediante la técnica *diffusion bonding* y segmentar lo menos posible la altura de la guía en todo el dispositivo, en este proyecto se ha optado por la utilización de un codo multiescalonado de tres secciones.

Para la fabricación del dispositivo, se introdujo el modelo ya diseñado en un bloque macizo de metal de unas dimensiones de 78 x 78 mm (ver Figura 5-2). Por la parte inferior desde donde se realiza la alimentación del modelo, se añadieron los taladros necesarios para la utilización del flange en guía de onda del estándar WR-10 cuyas dimensiones de pueden ver en el Anexo C.

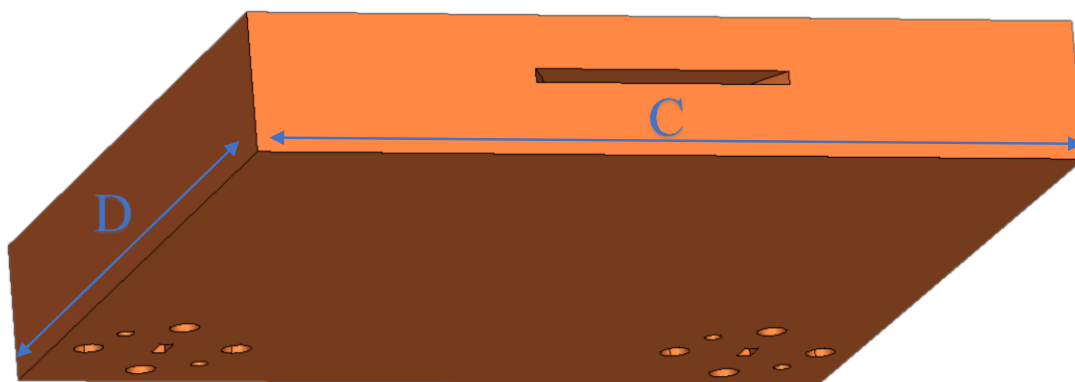


Figura 5-2: bloque del dispositivo a fabricar mediante la técnica *diffusion bonding*. Vista en perspectiva.

Por otro lado, se realizó un estudio del efecto del redondeo de las esquinas del interior del bloque. El radio mínimo propuesto desde la compañía que realiza el mecanizado fue de 0,075 mm. Sin embargo, con el fin de reducir los costes de fabricación y tras el estudio realizado, se determinó que cualquier radio menor de 0,3 mm sería aceptado, ya que no afectaría al rendimiento del dispositivo.

Además de esto, puesto que mediante la técnica *diffusion bonding* la pieza iba a estar sometida a gran presión para la unión de las láminas, se adaptó la apertura de la antena para que, al ser está sometida a una fuerte presión, no se abombase. Por último, con el fin de disminuir la dificultad en el proceso de fabricación, se determinaron una serie de dimensiones variables que se dejaron libres para el fabricante. Estas dimensiones se muestran en la Figura 5-2 y en la Figura 5-3 con las letras A, B, C y D.

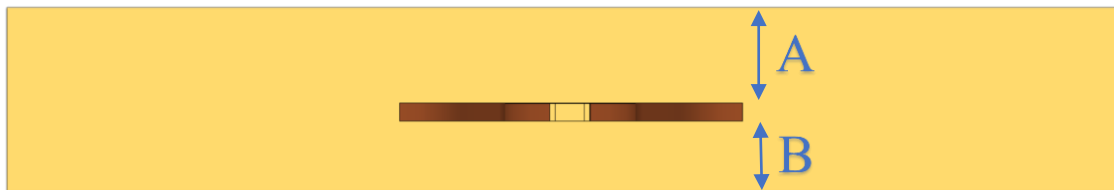


Figura 5-3: bloque del dispositivo a fabricar mediante la técnica *diffusion bonding*. Vista alzado.

Todas estas especificaciones se entregaron a la empresa junto con el modelo-3D de cara a obtener el presupuesto de fabricación del dispositivo. Tras una larga comunicación, finalmente, el presupuesto obtenido estaba por encima del previsto (ver Anexo A). Por ello este método de fabricación se descartó.

5.2 Fabricación mediante impresión 3D

Tras descartarse por su alto coste la técnica de fabricación *diffusion bonding* se comenzó a estudiar otros posibles métodos de fabricación. Tras un estudio de las posibles alternativas que existen en el mercado, finalmente se ha optado por la impresión 3D.

Como la fabricación del bloque completo mediante impresión 3D presentaba muchas dificultades técnicas, se decidió dividir el dispositivo en dos secciones (ver Figura 5-4). Por un lado, se generó un bloque de plástico que contiene el interior del dispositivo. Por otro lado, se diseñó un bloque metálico que actúa de tapa de la parte de plástico y, además, a través de este módulo se realiza la tarea de alimentación.

En la Figura 5-5 se puede observar en detalle el resultado final de la pieza de plástico. Esta pieza se envió a fabricar a la empresa Protolab [27] que posteriormente metalizará la pieza. Esta metalización se llevará a cabo mediante la técnica *Jet metal* que actualmente se está estudiando para su aplicación en antenas, puesto que en ellas se obtiene un gran rendimiento [14], [28]. Además, mediante la combinación de ambas técnicas, se consigue reducir los costes del dispositivo. El presupuesto completo se puede consultar en el Anexo A. Por otro lado, si se desea hacer un estudio más en profundidad del bloque, en el Anexo B se presentan los planos del bloque enviado a fabricar.

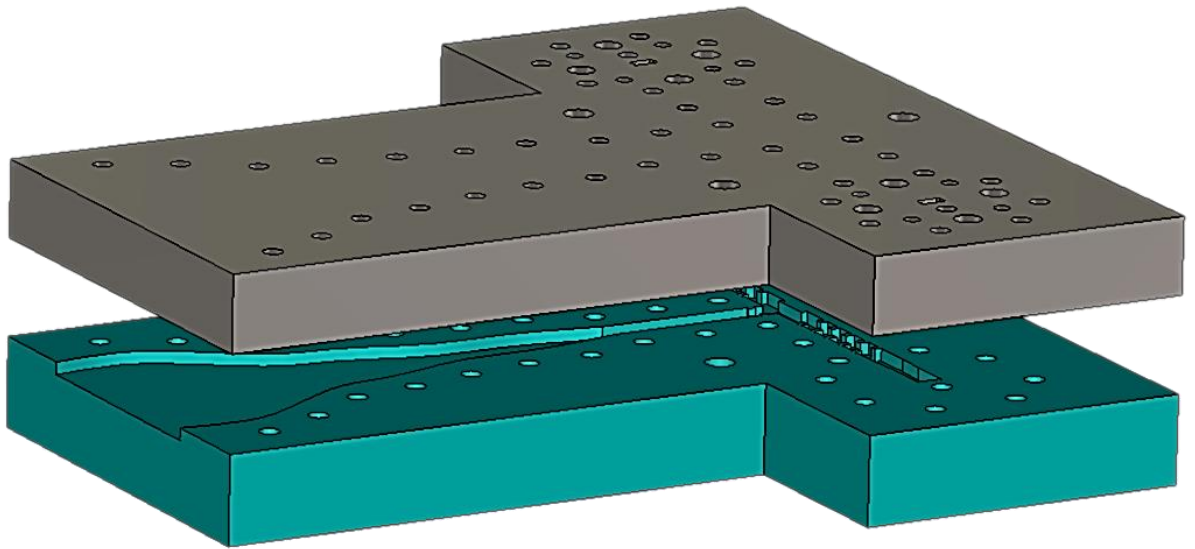


Figura 5-4: división del dispositivo en dos bloques para su fabricación

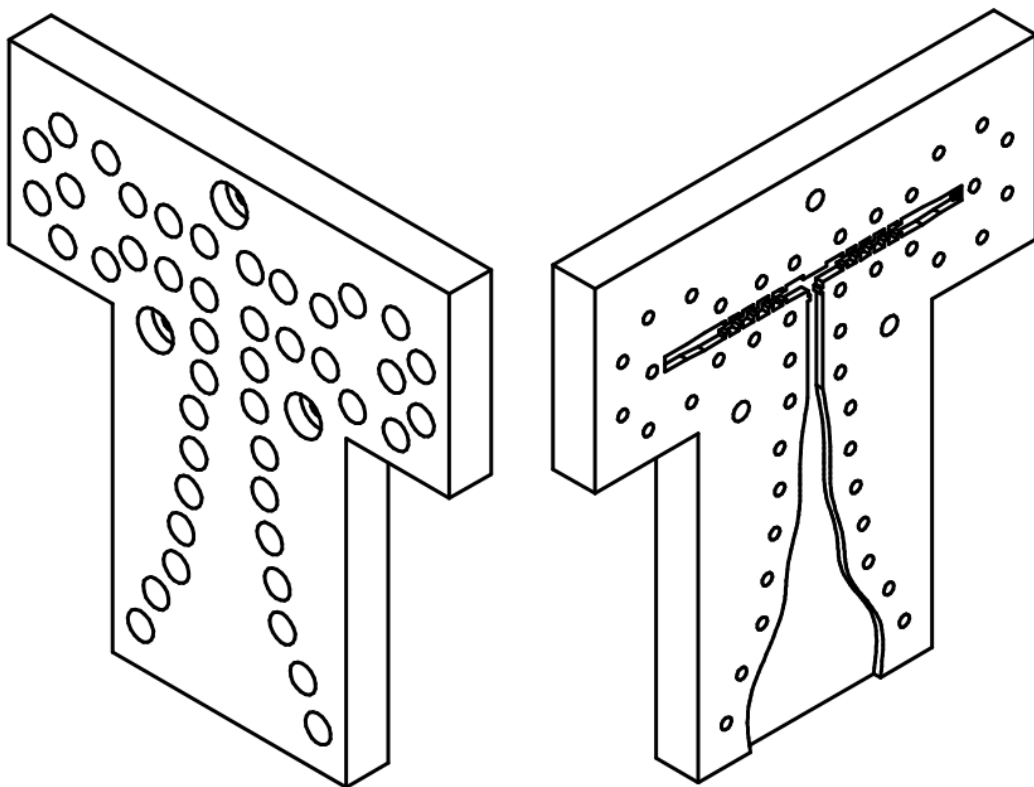


Figura 5-5: pieza de plástico a fabricar y metalizar mediante *jet metal*.

La parte superior de la Figura 5-5 se corresponde con la pieza metálica a fabricar. En la Figura 5-6 se puede observar dicho bloque con más detalle. La mecanización de esta pieza la va a llevar a cabo la empresa Materialise [29]. Este bloque va a construirse en su totalidad con aluminio y poseerá las mismas dimensiones que la pieza de plástico. Este bloque funcionará a modo de tapa del dispositivo y, además, como ya se ha comentado, la unión del flange estándar WR-10 se llevará a cabo a través de su superficie. Para la mecanización de la pieza, ha sido necesario redondear las esquinas de la guía que conecta con el flange. Tras un estudio de los efectos de aplicar el redondeo a la estructura, se ha optado por la opción de un redondeo de 0,25 mm que, como se puede ver en la Figura 5-7, no afecta a los resultados del diplexor.

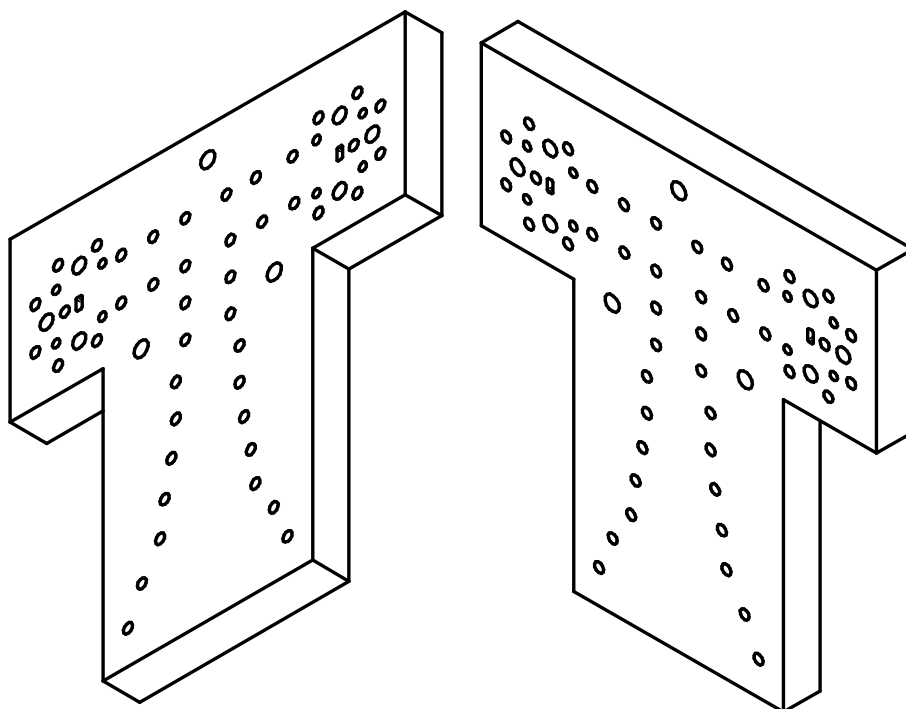


Figura 5-6: pieza de metálica a fabricar.

Como ya se ha comentado anteriormente, al trabajar en bandas de frecuencia tan elevadas, el contacto entre ambas piezas es crítico. Para evitar la pérdida de potencia entre ambas piezas y mejorar la unión, se ha introducido un anillo de tornillos de métrica dos alrededor de toda la estructura. Estos tornillos se enterrarán en la superficie de plástico y se enroscarán en la de metal realizando así una mejor conexión entre ambos bloques. Por último, para el anclaje del dispositivo y hacer posible la medición de este en una cámara anecoica, se han introducido tres taladros M3 para una correcta sujeción.

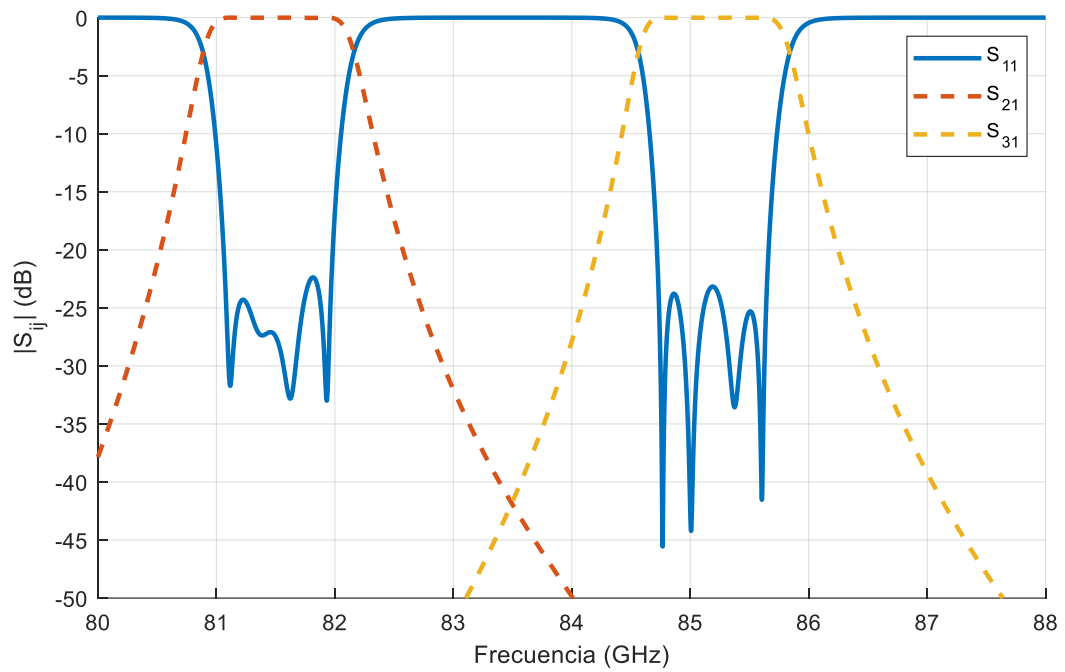


Figura 5-7: resultado del diplexor con un redondeo en la guía de entrada de 0,25mm.

Por último, en la Figura 5-8 se puede apreciar el resultado final del bloque metálico después de la fabricación.

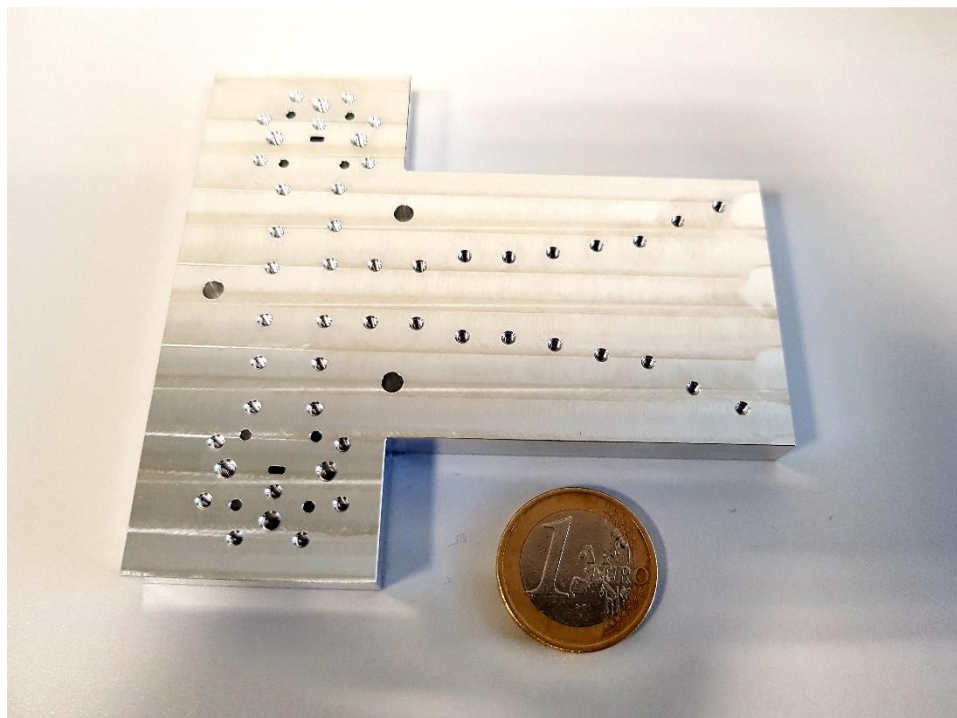


Figura 5-8: pieza metálica después de la fabricación.

5.3 Pieza de sujeción

Una vez finalizada la fabricación del dispositivo, se procederá a su caracterización en la cámara anecoica. Para poder llevar a cabo las medidas, es de vital importancia cerciorarse de la correcta sujeción de la antena. Como se puede observar en la Figura 5-5, en la Figura 5-6 o en el Anexo B, se han colocado tres taladros de M3 que se encargarán de unir el dispositivo a una pieza de sujeción. Para poder realizar el proceso de medición correctamente, se ha desarrollado una pieza que se encajará al soporte de la cámara anecoica y, además, sujetará la antena (ver Figura 5-9).

Además, al soporte 3D desarrollado se le han añadido unos agujeros inferiores por los que se colocaran los flanges de la guía WR-10 y un agujero rectangular para facilitar las conexiones con el analizador de redes.

La Figura 5-9 desarrollada se imprimirá mediante la impresora 3D Ultimaker disponible en el laboratorio RFCAS. El resultado obtenido es el que se muestra posteriormente en la Figura 5-10 y en la Figura 5-11.

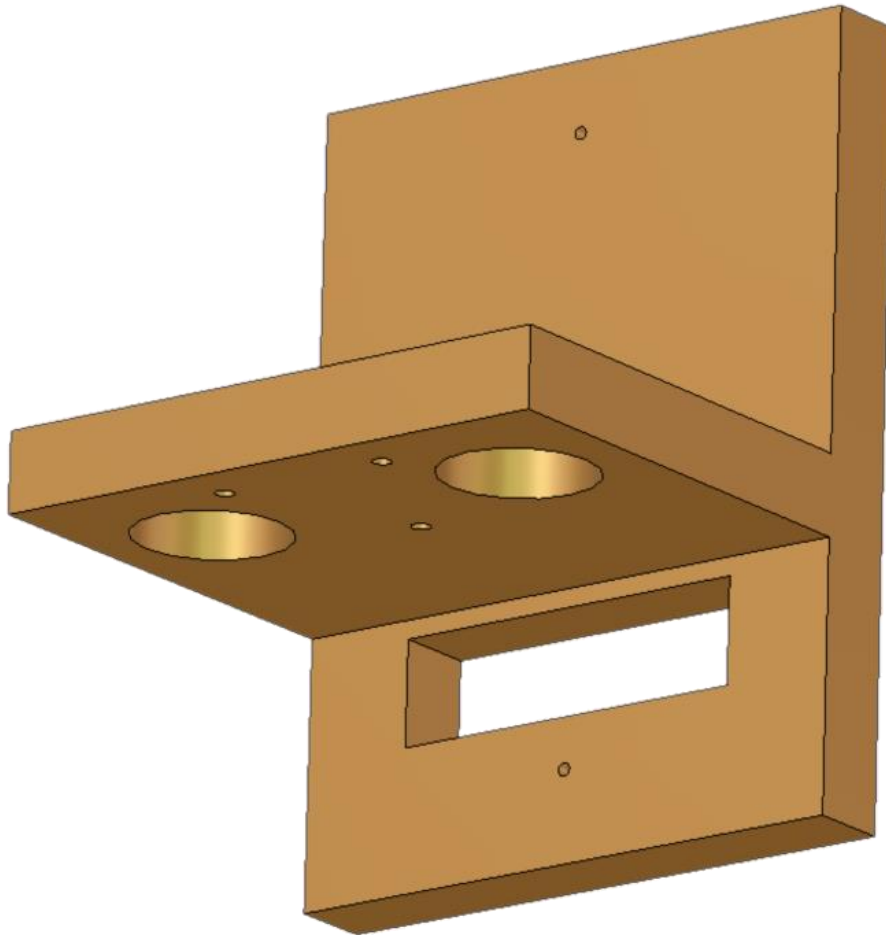


Figura 5-9: pieza desarrollada para la sujeción del dispositivo y su anclaje en la cámara anecoica.

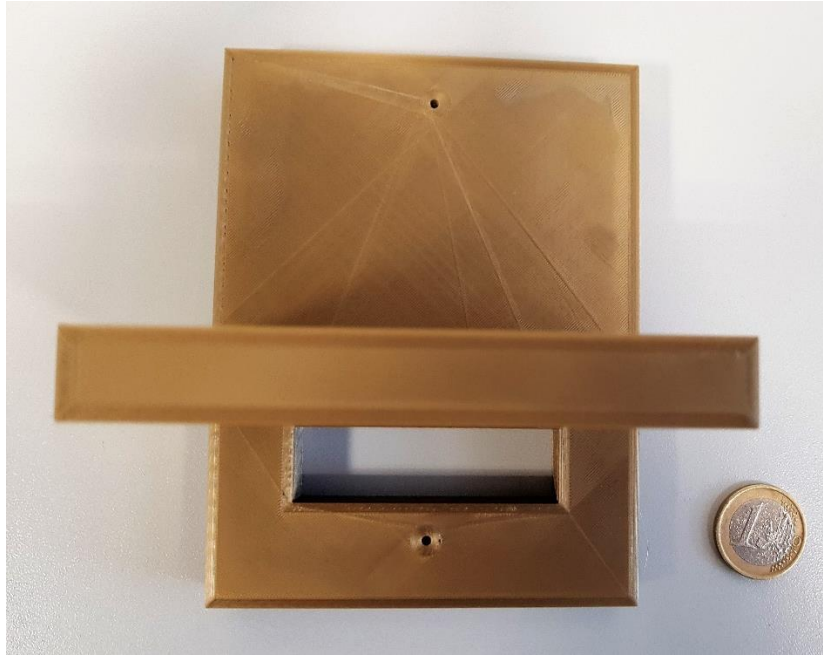


Figura 5-10: soporte fabricado mediante impresión 3D. Vista en alzado.

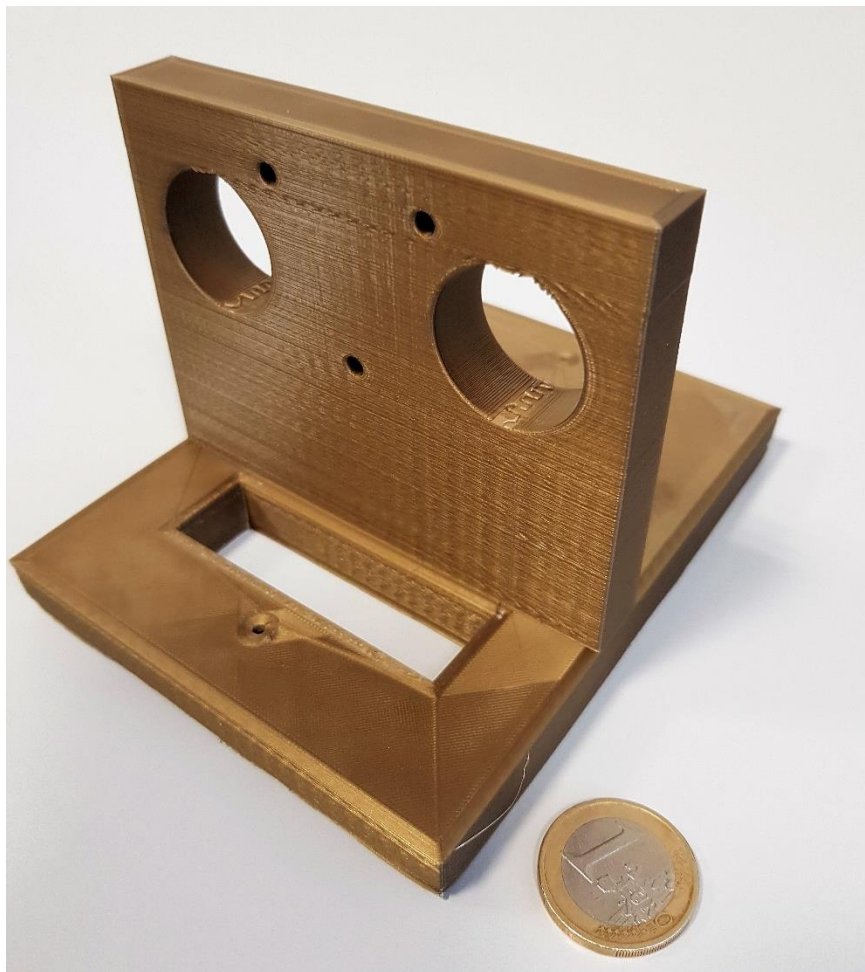


Figura 5-11: soporte fabricado mediante impresión 3D. Vista en perspectiva.

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster ha sido el desarrollo de un sistema radiante sectorial con capacidad de transmisión y recepción simultánea en banda-W, donde se proporcionará servicio 5G. Para llevar a cabo la implementación del sistema, se ha dividido el proyecto en dos grandes bloques: el desarrollo de la bocina sectorial plano H y el diseño de un diplexor.

Para el desarrollo de dichos bloques, se han empleado técnicas CAD basadas tanto en análisis numéricos como en análisis cuasianalíticos. Sin embargo, para algunos problemas en particular, la técnica mediante análisis numérico requería demasiado tiempo de cómputo y por ello se ha adaptado. Con el objetivo de reducir el tiempo de ejecución de las simulaciones se ha generado un programa que utiliza el método FEM-2D (*Finite Element Method*). El uso de esta técnica es posible gracias al desarrollo de toda la estructura en plano H. Este trabajo añade a la librería de estructuras del grupo RFCAS un nuevo programa parametrizable capaz de simular estructuras plano H en T mediante el método FEM-2D. Este software ha sido clave para el diseño y optimización del diplexor.

Por otro lado, en este proyecto se han presentado diferentes topologías para una antena de bocina sectorial multibanda. Finalmente, se ha optado por una configuración poco común, una bocina tipo *spline*. Esta configuración ha permitido añadir más variables al diseño, así como optimizar la antena para mejorar su rendimiento.

Uno de los objetivos de este proyecto ha sido lograr llevar a cabo físicamente el dispositivo para su posterior medición. La fabricación de un dispositivo que trabaja en esta banda supone todo un reto debido a las reducidas dimensiones que presenta la estructura. La primera técnica estudiada ha sido la mecanización mediante la técnica *diffusion bonding*. Para facilitar la fabricación y abaratar los costes, se generó un modelo adaptado a esta tecnología. Sin embargo, debido al alto coste de fabricación finalmente se descartó.

Otra de las tecnologías de fabricación que podía proporcionar la precisión suficiente para construir el dispositivo era la impresión 3D. La construcción del sistema en un solo bloque era inabordable debido a la dificultad que presentaba la metalización de las caras interiores del mismo. Por tanto, se dividió la pieza en dos bloques: un bloque de plástico con la estructura interna del sistema que debía metalizarse y otro de metal a través del cual se realiza la alimentación y que actúa como tapa. La unión de ambas piezas requiere un buen acoplamiento entre ambas para evitar la pérdida de potencia. Para disminuir este efecto se ha añadido al bloque un anillo de tornillería alrededor de la estructura que presionará ambas piezas.

Uno de los hitos de este proyecto era la fabricación del dispositivo, objetivo que se ha cumplido. Finalmente se ha podido mandar a construir utilizando la técnica de fabricación aditiva por impresión-3D, demostrando que el proyecto es realizable.

6.2 Trabajo futuro

Siguiendo con la línea de investigación del 5G surgen varias dudas acerca de las especificaciones finales que tendrá la nueva generación de comunicaciones móviles. Habrá que estar pendiente a la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR) de 2019 organizada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), en la cual se espera que se asienten las bases finales de esta nueva generación. Por tanto, una de las primeras líneas de trabajo será adaptar el sistema diseñado a las bandas que finalmente se establezcan para realizar las comunicaciones.

Por otro lado, a pesar de que se ha llevado a cabo la fabricación del dispositivo, por cuestiones de tiempo no ha sido posible medir los resultados. En consecuencia, se podría continuar con un estudio de las mediciones tomadas frente a las simulaciones realizadas en este trabajo.

Referencias

- [1] «Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G,» Universidad Internacional de Valencia, 12 10 2016. [En línea]. Available: <https://www.universidadviu.es/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>.
- [2] L. Guangyi , H. Yuhong , W. Fei , L. Jianjun y W. Qixing , 5G features from operation perspective and fundamental performance validation by field trial, China: China Communications (Volume: 15 , Issue: 11 , Nov. 2018), 2018.
- [3] S. Vij y A. Jain, 5G: Evolution of a secure mobile technology, New Delhi, India: IEEE, 2016.
- [4] «Plan Nacional 5G 2018-2020,» pp. 16-22, 1 diciembre 2017.
- [5] «Actas finales Conferencia mundial de radiocomunicaciones,» de *CMR-15 Resolución* 238, Ginebra, 2015.
- [6] M. Bougiokos, «Preparing microwave transport network for the 5G,» Nokia Networks, 2017.
- [7] «Ericsson microwave outlook,» Ericsson, 2017.
- [8] R. Lombardi, Millimeter-wave for 5G, Backhaul and access, Huawei, 2016.
- [9] P. Nava, «IMT backhaul,» Huawei, San Petersburgo , 2018.
- [10] Z. Du, E. Ohlmer, K. Aronkytö, J. Putkonen, J. Kapanen y D. Swist, 5G E-band backhaul system measurements in urban street-level scenarios, Nuremberg, Germany: IEEE, 2017.
- [11] C. A. Balanis, Antenna theory: Analysis and design, Hoboken, NJ: Wiley, 2015.
- [12] J. Ruiz-Cruz, J. Montejo-Garai y J. Rebollar, "Computer Aided Design of Waveguide Devices by Mode-Matching Methods" in "Passive Microwave Components and Antennas", In-Teh, 2010.
- [13] Milligan. T.A, Modern Antenna Design, Wiley, 2015.
- [14] A. Jammes, M. Petisme y K. Staelens, Properties of antennas made with sprayed selective silver metallization, Paris, Francia: 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2017.
- [15] S. Zhou, G. Pan, K. Zhang, C. Pan y C. Davis, E-Band 3-D Printed Antenna Fabrication and Measurement Using VNA and One-Side Frequency-Extender, San Jose, CA, USA: 2018 IEEE 27th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS), 2018.
- [16] J. Wang et al., Solid-State-Diffusion Bonding for Wafer-Level Fine-Pitch Cu/Sn/Cu Interconnect in 3-D Integration, vol. 1, IEEE Trans. Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, pp. 19-26.
- [17] T. Tomura et al., 45° Linearly Polarized Hollow-Waveguide Corporate-Feed Slot Array Antenna in the 60-GHz Band, vol. 8, IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2012, pp. 3640-46.

- [18] E. Garcia-Marin, J. L. Masa-Campos and P. Sanchez-Olivares, "Implementation of Millimeter Wave Antenna Arrays by Diffusion Bonding," 2018 11th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM), Boulder, CO, USA, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/GSMM.2018.8439652
- [19] E. Garcia-Marin, J. L. Masa-Campos and P. Sanchez-Olivares, "Diffusion Bonding Manufacturing of High Gain W-Band Antennas for 5G Applications," in IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 7, pp. 21-27, July 2018. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700986
- [20] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Hoboken, NJ : Wiley, 2012.
- [21] J. Uher , U. Rosenberg y J. Bornemann, Waveguide components for antenna feed systems: Theory and CAD., Artech house, 1993.
- [22] C. Granet y T. S. Bird, Optimization of corrugated horn radiation patterns via a spline-profile, In Antem 2002: Proceedings of the 9th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)., 2002.
- [23] R. Dey, S. Chakrabarty, R. Jyoti y T. Kurian, Synthesis and analysis of multi-mode profile horn using mode matching technique and evolutionary algorithm, vol. 3, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2016, pp. 276-282.
- [24] K. R. Mahmoud y A. M. Montaser, Performance of Tri-Band Multi-Polarized Array Antenna for 5G Mobile Base Station Adopting Polarization and Directivity Control, IEEE, 2018.
- [25] I. O. d. S. Pantoja y J. R. M. Garai, Ku band waveguide diplexer design for satellite communication implementation by additive manufacturing and experimental characterization, Madrid: Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones (UPM), 2015.
- [26] V. Tsakiris et al., Materials Bonding by Diffusion Welding Technology, Timișoara, Romania: 2007 1st Int'l. Conf. Innovative Technologies for Joining Advanced Materials, June 2017.
- [27] Protolabs, 2019. [En línea]. Available: <https://www.protolabs.com/>.
- [28] D. Escalona Moreno y J. L. Masa-Campos, Antenas de ranuras conformada de alta ganancia sobre guía de onda circular para comunicaciones móviles 5G, Madrid, España: UAM. Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones, 2018.
- [29] Materialise. [En línea]. Available: <https://www.materialise.com/en>.
- [30] A. Jammes, M. Petisme y K. Staelens, Properties Of Antennas Made With Sprayed Selective Silver Metallization, Paris, France: IEEE, 2017.

Glosario

TFM	Trabajo de Final de Máster
RFCAS	Radiofrequency Circuits, Antennas and Systems
UAM	Universidad Autónoma de Madrid
EPS	Escuela Politécnica Superior
CST	Computer simulation technology
RF	Radiofrecuencia
GHz	Gigahercio
SLL	Side Lobe level
ITU	International Telecommunication Union
CMR	Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones
5G	Quinta generación
2D	Dos Dimensiones
3D	Tres Dimensiones
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

Anexos

A Presupuesto para los modelos de fabricación

A.1 Presupuesto de construcción mediante la técnica *diffusion bonding*

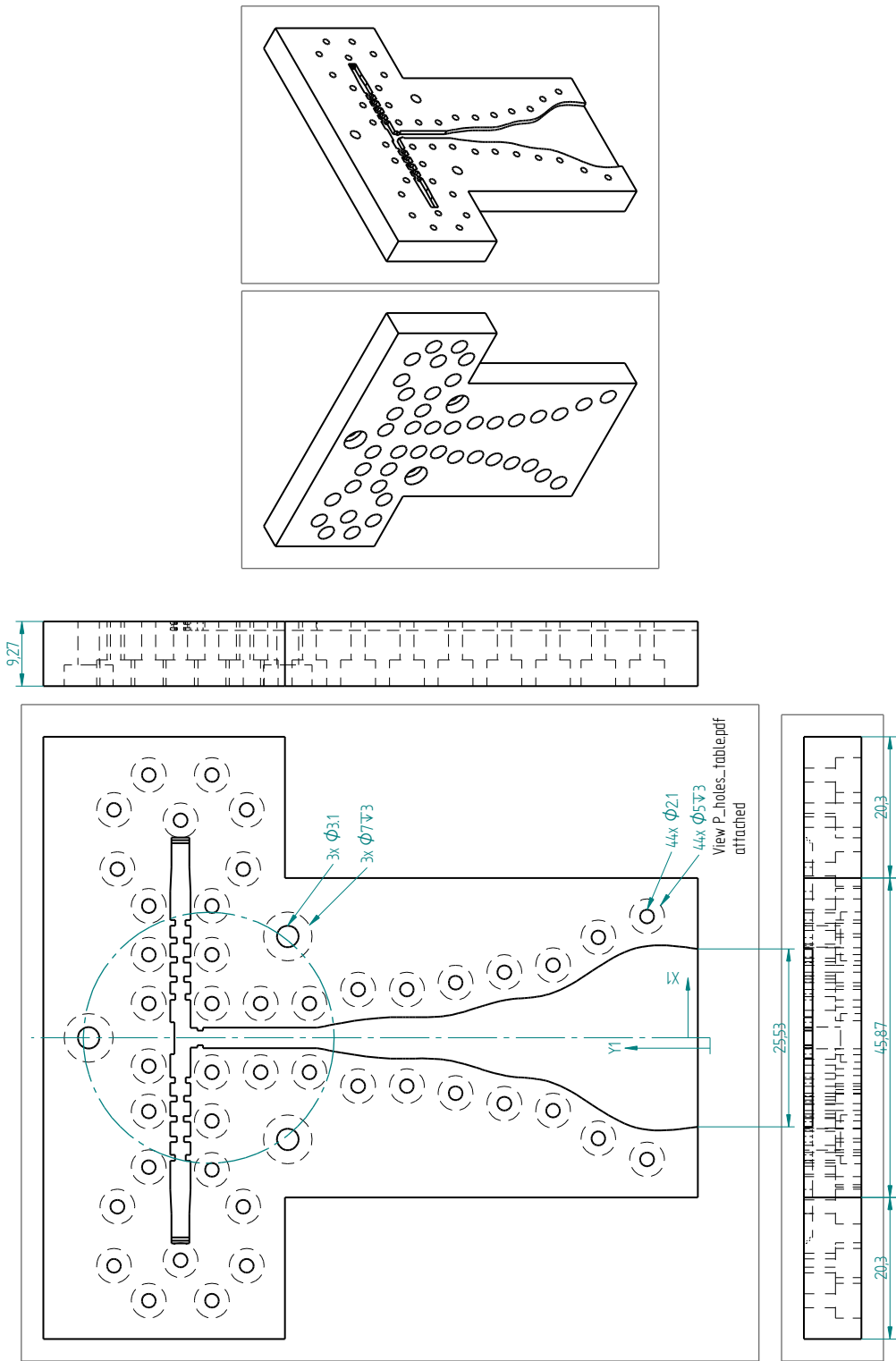
Producto	Número unidades	Precio Unidad	Precio Total
Modelo preparado para construir mediante <i>diffusion bonding</i>	2	4.374,38 €	8.748,76 €

A.2 Presupuesto de construcción mediante la técnica *de impresión 3D*

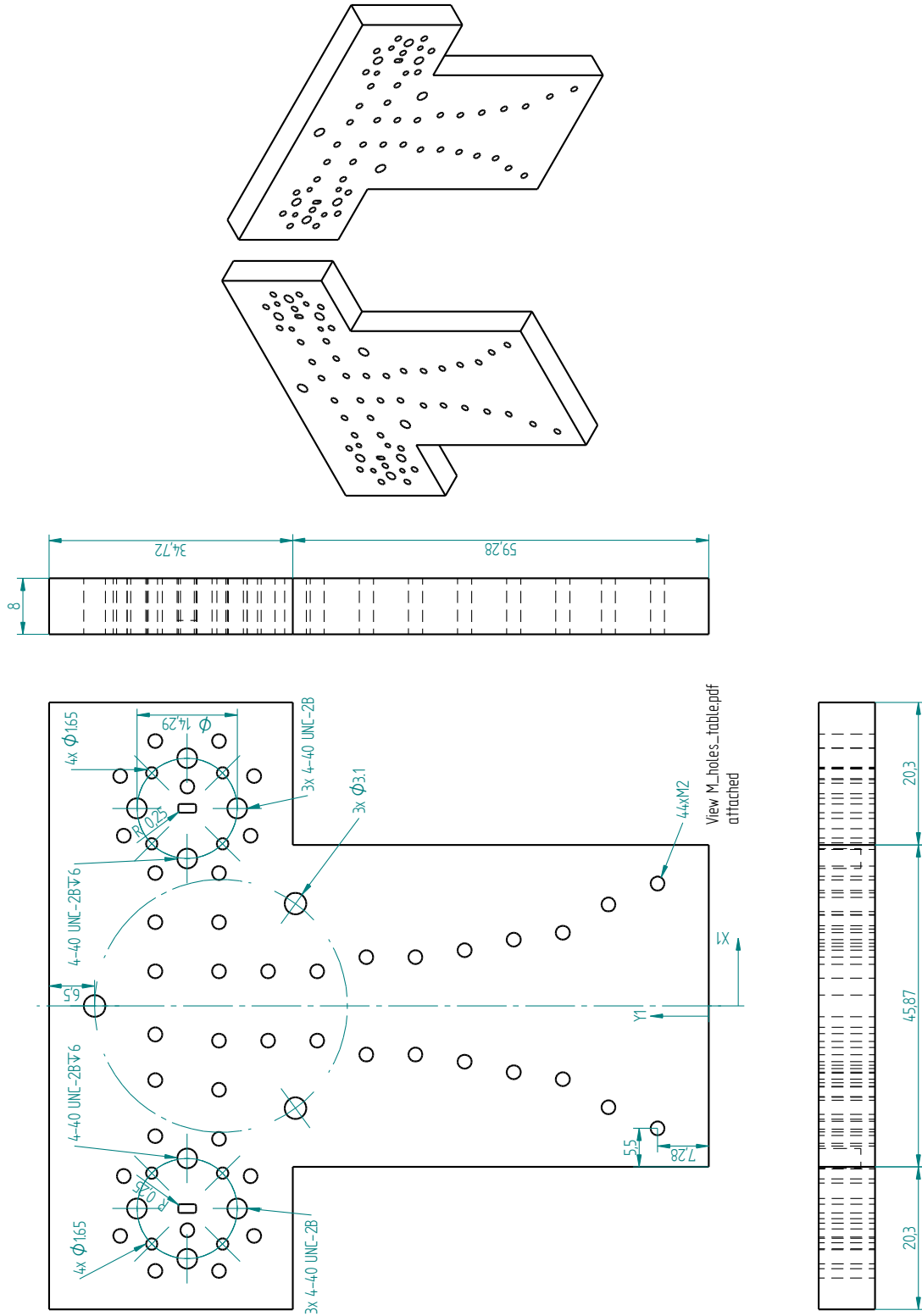
Producto	Número unidades	Descripción	Precio Total
Bloque plástico	1	Construcción de estereolitografía de alta resolución Accura Xtreme Blanco en capas de 0,05 mm.	275,00 €
Bloque metálico	1	Construcción high Speed Machining (HSM)	165,00 €
Metalización Jet Metal	1	Metalización del plástico ABS. Espesor del recubrimiento 0,8µm.	165,00 €
		TOTAL	605,00 €

B Planos de fabricación

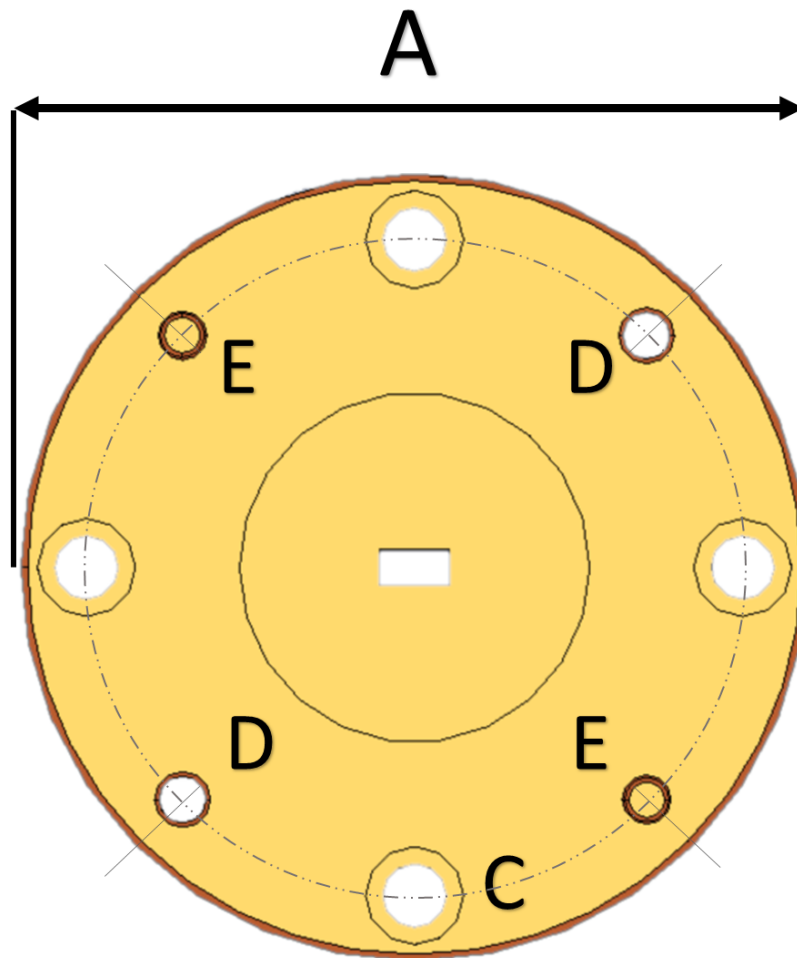
B.1 Plano pieza de plástico



B.2 Plano pieza metálica



C Estándar flange WR-10



Taladros C.....4 x 4-40 UNC-2B

Taladros D.....2 x 1,65 mm dia

Taladros E.....2 x dowels 1,562
mm dia

Todos los taladros en un diámetro
de 14,29mm

A.....19,09mm

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un diseño de un sistema radiante sectorial con capacidad de transmisión y recepción simultánea en banda W. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no Figuran en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque Figuran por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del

contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.